



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

MOŽNOSTI SILOVÉHO ŘÍZENÍ LINEÁRNÍCH POHONŮ

FORCE CONTROL POSSIBILITIES OF LINEAR DRIVES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

EVGENIY MERZLIAKOV

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PAVEL HOUŠKA, PH.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automatizace a informatiky

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Evgeniy Merzliakov

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Aplikovaná informatika a řízení (3902R001)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Možnosti silového řízení lineárních pohonů

v anglickém jazyce:

Force control possibilities of linear drives

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá problematikou silového řízení lineárních motorů a možností využití měření proudu motorem pro silové řízení. Hlavní částí práce je provedení experimentů s řídicí jednotkou Faulhaber MCLM a lineárním pohonem LM 2070. Výsledkem bude posouzení vhodnosti použití tohoto pohonu jako náhrady za pneumatický pohon.

Cíle bakalářské práce:

1. Seznamte se s problematikou řízení lineárních pohonů.
2. Seznamte se se způsoby silového řízení.
3. Analyzujte nutnou sensoriku potřebnou pro silové řízení.
4. Na experimentálním zařízení ověřte použitelnost řídicí jednotky Faulhaber MCLM pro silové řízení.

Seznam odborné literatury:

- [1] Pavelka J., Čerovský Z., Javůrek J., Elektrické pohony, Nakladatelství ČVUT, Praha 2003
- [2] Souček, P.: Servomechanismy ve výrobních strojích, monografie, vydavatelství ČVUT 2004, ISBN 80-01-02902-6
- [3] Fraden, J.: Handbook of Modern Sensors, 2004, Springer-Verlag, ISBN 0-378-00750-4
- [4] Noskiewicz, P.: Modelování a identifikace systémů, Montanex a.s., Ostrava 1999, ISBN 80-7225-030-2
- [5] National Instruments: LabVIEW Measurements Manual 322661 [online], 2003, dostupné z URL: <<http://www.ni.com>>

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Pavel Houška, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 21.11.2013



Ing. Jan Roupec, Ph.D.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá možnostmi silového řízení lineárních pohonů. Obsahuje rozdělení lineárních pohonů, popis používaného motoru, řídicí jednotky a komunikačního protokolu. Dále obsahuje popis principů, metod regulace, návrh testovacího zařízení a programu v prostředí NI LabVIEW. Rovněž zahrnuje i výsledky měření pomocí navrhnutého softwaru.

ABSTRACT

This bachelor thesis is about force control possibilities of linear drives. It contains the dividing of linear drives, the description of motion controller and linear drive, which were used for experiment. Also it contains the description of communication protocol, methods and principle of regulation, designing of the experimental equipment and the program in NI LabVIEW as well as the results of measurement with this software.

Klíčova slova:

Tubulární lineární aktuátor, LabVIEW, CANopen, servopohon, lineární motory.

Keywords:

Tubular linear actuator, LabVIEW, CANopen, servodrives, linear drives.

PROHLÁŠENÍ O ORIGINALITĚ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na tem Možnosti silového řízení lineárních pohonů vypracoval samostatně dle rad a pokynů vedoucího práce a s použitím odborné literatury, uvedené v seznamu.

Datum 29.5.2014

.....

Evgeniy Merzliakov

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MERZLIAKOV, E. *Možnosti silového řízení lineárních pohonů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 46 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Houška, Ph.D..

PODĚKOVANÍ

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi pomáhali při vypracování bakalářské práce. Především, panu Ing. Pavlu Houškovi, Ph.D. za jeho cenné rady a připomínky. Dále děkuji firmám Routech s.r.o. a Faulhaber za zapůjčení motoru a řídicí jednotky pro realizaci této práce.

Obsah

1.	Úvod	10
2.	Lineární pohony.....	11
2.1	Nepřímé lineární pohony	11
2.1.1	Kuličkový šroub	11
2.1.2	Kluzný lichoběžníkový šroub.....	13
2.1.3	Ozubený hřeben.....	13
2.1.4	Ozubený řemen.....	14
2.2	Přímé lineární pohony.....	15
2.2.1	Asynchronní lineární pohon	15
2.2.2	Synchronní lineární pohony	16
2.2.3	Bezželezný lineární pohon.....	17
2.2.4	Tubulární lineární motor.....	18
2.2.5	Krokové lineární motory	19
3.	Faulhaber LM-2070.....	20
3.1	Řídicí jednotka MCLM3002 S CF.....	20
3.2	Hallové Snímače	21
3.3	Uspořádání LM-2070.....	22
4.	CANopen.....	23
4.1	Typy komunikace	23
4.1.1	Master-slave.....	24
4.1.2	Producer-consumer.....	24
4.1.3	Klient-server	25
4.2	Vysílání dat v reálném čase	25
4.2.1	Typy a struktura datových rámců	26
4.3	Detekce a korekce chyb	27
4.4	Identifikátory protokolu CANopen.....	28
4.5	Objektový slovník.....	28
4.5.1	Objekty	29
4.6	Řízení pohonu (Dle CIA DS402).....	31
4.6.1	Inicializace pohonu.....	31
4.6.2	Řízení polohy (dle CIA DS402 Profile Position Mode).....	34
4.6.3	Řízení rychlosti (dle CIA DS402 Profile Velocity Mode)	36
5.	Návrh testovacího zařízení s lineárním pohonem.....	38
5.1	Požadované režimy testování.....	38
5.1.1	Vibrační stolek.....	38

5.1.2	Lineární aktuátor s měřením vyvozované síly.....	38
5.2	Návrh přípravku	39
5.3	Návrh software pro experimenty	40
5.3.1	Software pro vibrační stůl.....	40
5.3.2	Software pro lineární aktuátor s měřením síly.....	42
5.4	Výsledky měření	42
5.4.1	Výsledky testu s vibračním stolem.....	42
5.4.2	Výsledky testu lineárního aktuátoru s měřením síly	43
6.	Závěr	44
	Seznam použité literatury	45

1. Úvod

V moderní výrobě úloha řízení polohy zaleží na různých typech mechanických převodu a pneumatických systémů. Avšak rostoucí požadavky na rychlost, spolehlivost, rozsah a přesnost regulaci ukázali nevýhody podobných strojů:

V porovnání s elektrickými pohony, pneumatické mají řadu slabin jako složitost regulace rychlostí, pomalá odpověď na regulaci, adaptace pohonu k dynamickému zatížení, mály výkon v porovnání s elektrickými pohony a vysoký úroveň hluku.

Mechanické převody již narážejí na hranice svých možností a oproti minulosti se stávají omezujícím prvkem při zvyšování a přesnosti posuvu. Každé další malé zlepšení jejich vlastností je nutno vyvážit velkými náklady a úsilím při vývoji, zatímco v elektrotechnice je vývoj dynamičtější.

Kvůli těmto nevýhodám, vývoj mechanické stavby strojů postupuje v současně době pomaleji a „bolestivěji“ než vývoj v oblasti elektroniky. V oblasti pohonů se to projevuje ubýváním mechanických převodu, jejichž funkce přebírají elektrické regulační pohony. Výhodou elektrických pohonů je snadná řiditelnost a ovladatelnost, nízký poměr hluk/výkon, dlouhá životnost.

Hlavním cílem této práce je seznámení se s možnostmi sílového řízení lineárních pohonů. Toto téma jsem vybral díky svému zajmu a příležitosti rozšířit si znalosti v této problematice.

Tato práce se v teoretické části zaměřuje na rozdělení a popis lineárních elektrických pohonů, komunikace s řidičí jednotkou a způsoby řízení jednotky, která je použita v experimentu. Experiment je rozdělen na dvě části:

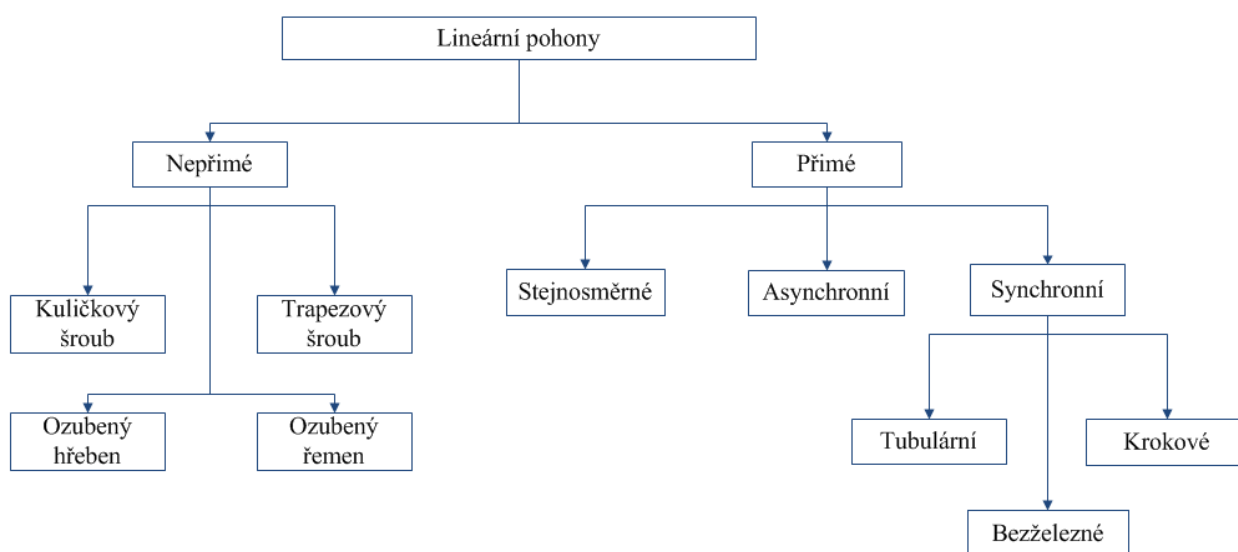
První část spočívá v návrhu aplikaci na testování tlačítek, kde se kontroluje síla potřebná k sepnutí a rozepnutí tlačítka. Toto musím provést s využitím tubulárního elektrického aktuátoru. Na základě prováděných měření musím posoudit o náhradě pneumatického aktuátoru, který se používá v aktuálním testeru a který bylo by vhodně nahradit s provozních důvodů.

V druhé části se jedná o vibrační stolek pro testování vibračních principů získávání elektrické energie .

2. Lineární pohony

Lineární pohony lze dělit na elektrické, pneumatické a hydraulické. Elektrické lineární pohony lze dále dělit na pohony s elektromagnetickou přeměnou, piezoelektrickou přeměnou a na ostatní. Protože cílem této práce je posouzení lineárního pohonu s elektromagnetickou přeměnou budou dále rozebrány pouze pohony s elektromagnetickou přeměnou.

Lineární stroje, stejně jako i rotační elektrické, můžeme podělit na stroje využívající stejnosměrný a střídavý proud. Střídavé stroje se dělí na synchronní a asynchronní. Lineární pohon s elektromagnetickou přeměnou může být řešen buď lineárním motorem, nebo rotačním motorem s mechanickým převodem na lineární pohyb (šroub, ozubený hřeben, atd.). Provedení s rotačním motorem je také označované jako nepřímý lineární pohon. Rozdělení elektrických lineárních pohonů je znázorněno na obr. 1.



Obr. 1: Rozdělení lineárních pohonů

2.1 Nepřímé lineární pohony

Nepřímé lineární pohony představují celou soustavu, která se skládá z točivého elektrického motoru a mechanického převodu. Využívají se následující typy motorů:

- Stejnoscsměrné
- Synchronní
- Asynchronní
- Krokové

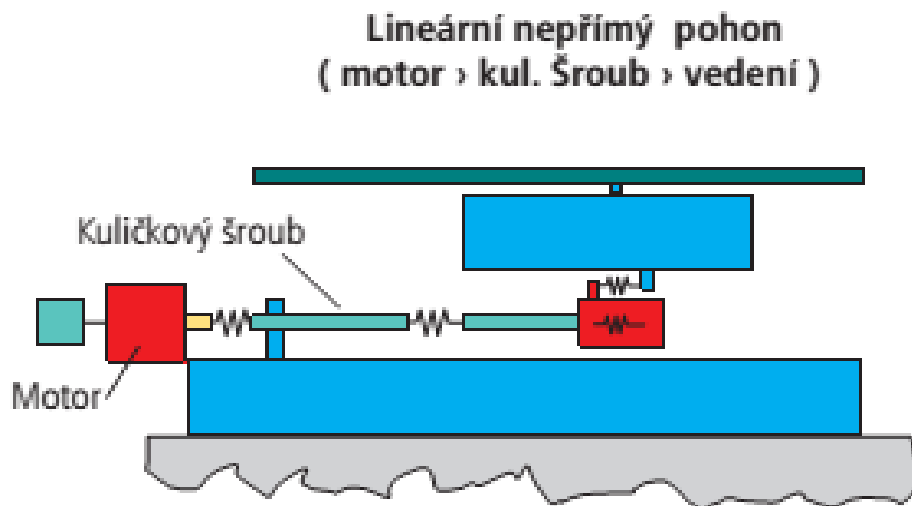
Převod je realizován pomocí těchto variant:

- Převod šroubem (kuličkový, lichoběžníkový)
- Převod ozubeným hřebenem
- Převod ozubeným řemenem

2.1.1 Kuličkový šroub

Jednou z variant nepřímého lineárního pohonu je převod rotačního pohybu na translační pomocí kuličkového šroubu. Základní sestava se skládá ze šroubu poháněného motorem, matice a zařízení, které zajišťuje oběh kuliček. Na rozdíl od kluzných šroubů, které se vyznačují vyšším součinitelem tření a nižší účinností, kuličkový šroub přemění zpravidla 90 % točivého momentu motoru na posuvnou sílu (obr. 2).

K vysoké účinnosti přispívá hřídel s přesnou válcovanou nebo broušenou šroubovou drážkou, která je vyrobena po celé délce hřídele, a matice s odpovídající vnitřní drážkou. Drážka v matici odpovídá vnější oběžné dráze, po níž se odvalují přesné ocelové kuličky, drážka na hřídeli má v podstatě funkci vnitřní oběžné dráhy. Kuličky, které se pohybují v drážce mezi hřídelí a maticí, vyvolávají lineární pohyb hřídele nebo matice v závislosti na požadavcích aplikace. Takové řešení zajišťuje minimální mechanické opotřebení a spolehlivou funkci po celou dobu životnosti šroubu.



Obr. 2. Uspořádání motoru s kuličkovým šroubem [2]

Jednou z nejdůležitějších částí kuličkového šroubu je zařízení, které vrací kuličky, které dosáhly konce oběžné dráhy uvnitř matice, zpátky na začátek dráhy a zajistí tak jejich oběh. K tomu účelu je určena vnější vratná trubka, která spojuje konec matice s jejím začátkem, tím uzavírá okruh obíhající kuliček. Vnější vratná trubka může být poškozena při montáži, proto existují alternativní řešení. Jedno z neúčinnějších řešení představuje kuličkový šroub s vestavěným systémem „bez vratné trubky“, s tzv. „vločkami“. Toto řešení využívá vodící čepy, které odebírají kuličky na konci drážky matice, vracejí je na začátek a tím uzavírají okruh obíhající kuliček. Kuličkové šrouby umožňují efektivním způsobem řešit lineární pohyb v spoustě aplikací, proto jsou nabízeny z různých materiálů a v různých provedeních [1].

Výhody převodu kuličkovým šroubem:

- Cenová dostupnost komponent
- Možnost velkých axiálních sil
- Možnost použít nepřímé odměřování
- Relativně vysoká tuhost

Avšak, tento převod má i své nevýhody:

- Rychlostní omezení posuvu
- Omezená délka zdvihu, v závislosti na přesnosti a požadovaném průměru šroubu
- Výrobní nepřesnosti
- Tepelná roztažnost komponent
- Nutnost mazání matice kuličkového šroubu
- Opotřebení komponent

2.1.2 Kluzný lichoběžníkový šroub

Trapézové šrouby s lichoběžníkovým závitem jsou standardním konstrukčním prvkem určeným pro samosvorný převod rotačního pohybu na přímočarý s nízkou účinností danou kluzným třením funkčních ploch jeho profilu, mazáním a použitým materiálem. Šrouby jsou vhodné pro přenos axiálního zatížení. Vymezení vůle mezi šroubem a maticí je nutné zajistit konstrukčně. Jsou vhodné pro velké axiální a radiální zatížení, např. při posuvu obrobků na obráběcích strojích. Účinnost šroubů závisí na velikosti stoupání šroubu a na velikosti tření v závitu mezi maticí a šroubem. Rostoucí stoupání a pokles pasivních odporů zvyšuje jejich účinnost. I když vyšší stoupání znamená vyšší účinnost šroubového převodu, klesá velikost axiální síly, kterou lze využít [3]. Převod lichoběžníkovým šroubem je znázorněn na obr. 3.



Obr 3: Převod lichoběžníkovým šroubem [4]

Výhody a nevýhody u převodu pomocí lichoběžníkového šroubu jsou stejné, jako u převodu pomocí kuličkového, avšak tento převod má menší účinnost a větší tření.

2.1.3 Ozubený hřeben

Princip funkce ozubeného hřebenu je ukázán na obr. 4, kdy se poháněný pastorek odvaluje po ozubeném hřebenu. Pohon se skládá z ozubeného hřebene, který má lichoběžníkový profil (ozubení s nekonečně velkým poloměrem). Tento profil je upevněn k rámu stroje, do ozubeného hřebene zapadá pastorek, pastorek je poháněn motorem, prostřednictvím převodovky. Díky vložené převodovce, snížíme otáčky motoru a získáme tak větší moment i větší posuvovou sílu [5] [6].



Obr. 4: Převod pomocí ozubeného hřebene [7]

Výhody tohoto převodu:

- Velké pracovní zdvihy

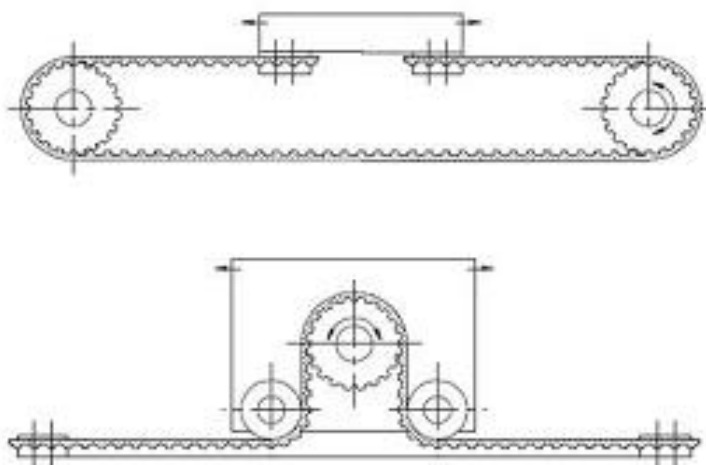
- Velké silové působení (velká hmotnost přesouvaných hmot)
- Využití převodovky, velký převodový poměr
- Možnost použití nepřímého odměřování

Nevýhody:

- Nutnost mazání, vlivem tření pak vzniká teplo a opotřebování komponent
- Pohon ozubeným hřebenem není samosvorný

2.1.4 Ozubený řemen

Pohon ozubeným řemenem, využívá synchronní ozubené řemeny, které jsou v dostání spolu s řemenicemi. Přenos síly z řemene na řemenici probíhá na základě tvarového styku. Profil řemene je realizován lichoběžníkovým, parabolickým nebo speciálním profilem. Samotný řemen se skládá se tří vrstev, ochranné, tažné a stykové. Konstrukci lineární jednotky lze použít ve dvou variantách provedení dle obr. 5. Na stejném obrázku můžeme také vidět uchycení řemene pomocí přílozek, které mají v podstatě negativní tvar k profilu řemene. Nevýhodou varianty na spodní části obrázku je nutnost montáže motoru na pohyblivém suportu, čímž se zvýší hmotnost přesouvaných hmot a navíc je nutné použít vedení pro energetické kabely a kabely odměřování [6] [8].



Obr. 5: Varianty převodu pomocí ozubeného řemene[9]

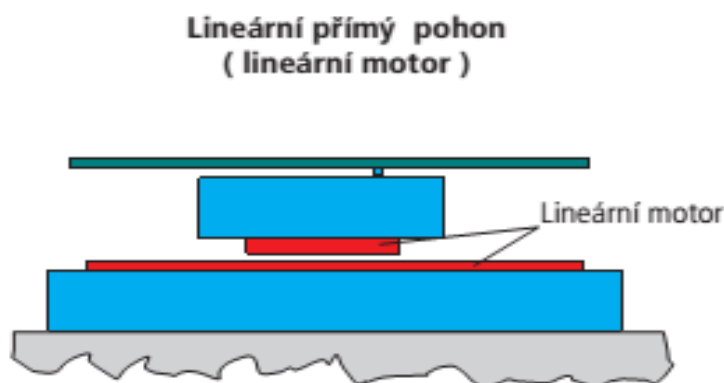
Výhody:

- Relativně nízká pořizovací cena
- Větší silové zatížení než lineární motor
- Nízká hlučnost
- Bezúdržbový provoz, bez nutnosti mazání

Nevýhody:

- Relativně nízká tuhost, velká deformace pro velké pracovní zdvihy
- Nerovnoměrný chod

2.2 Přímé lineární pohony



Obr. 6: Uspořádání přímého lineárního motoru.[2]

Statorem u lineárních motorů je označován primární díl, rotorem - sekundární. Primární část je tvořena feromagnetickým svazkem složeným z elektrotechnických plechů a trojfázového vinutí, které je uloženo v jeho drážkách. Proti primárnímu dílu je konstrukčně uspořádána sekundární část, tvořená permanentními magnety, které jsou nalepené na ocelové podložce a zalité v pryskyřici. Pokud přivedeme do primární části (tzv. jezdce) řídící proud, vznikne magnetické pole mezi oběma částmi a dojde k relativnímu pohybu. Pomocí úrovně proudu můžeme ovládat rychlost a sílu pohybu. Sekundární díl (magnetická dráha) je ve většině uspořádání delší částí stroje, kterou podle přání zákazníka lze sestavovat do určitých délek. V konstrukci, která je na obr. 6, se pohybuje primární část po dráze tvořené libovolným počtem sekundárních dílů. Nevýhodou tohoto uspořádání je, že k pohybující se části musí být přiveden napájecí kabel, kabel snímače polohy a případně přívod chladicí kapaliny. Vše pak musí být umístěno v energetickém řetězci, který chrání kabely před poškozením a zajišťuje plynulý pohyb vodičů s jezdce [2].

Výhody přímých lineárních motorů vůči nepřímým [6]:

- Rychlost posuvu
- Přesnost polohování
- Opakovatelnost
- Dynamika

Nevýhody přímých lineárních motorů:

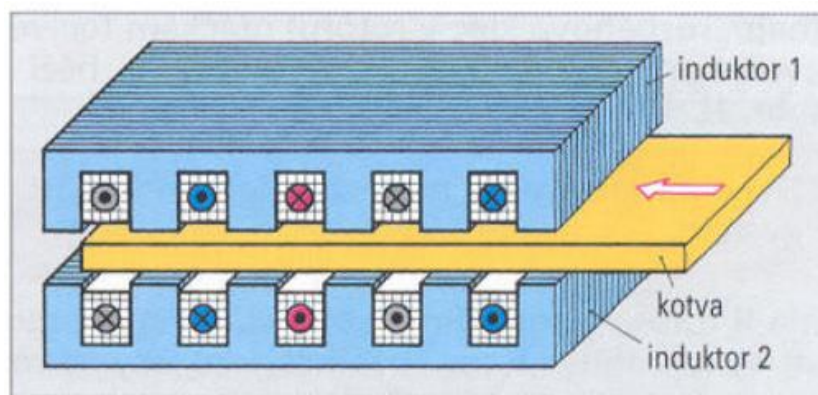
- Přívod elektrické energie do jezdce
- Cena

2.2.1 Asynchronní lineární pohon

Na rozdíl od synchronního lineárního motoru, kotva asynchronního lineárního motoru je řešena klecí nakrátko, co znamená, že sekundární díl je jednodušší a levnější. Klec nakrátko tvoří buď vinutí uloženo do drážek, nebo hliníkový (případně měděný) pás připevněný na ocelové podložce. Další výhodou pro tyto pohony je možnost přímého napájení ze standardní rozvodné sítě bez nutnosti použití měniče kmitočtu [10].

Asynchronní lineární pohon pracuje na následujícím principu: Postupné pole induktoru indikuje v kotvě silné vířivé proudy. Podle Lenzova pravidla jsou tyto proudy takového směru, že jejich indukované pole oslabuje postupné pole induktoru. Vířivé proudy vyvolávají v prostředí postupného pole induktoru sílu ve směru pohybu postupného pole. Je-li induktor upevněn a kotva

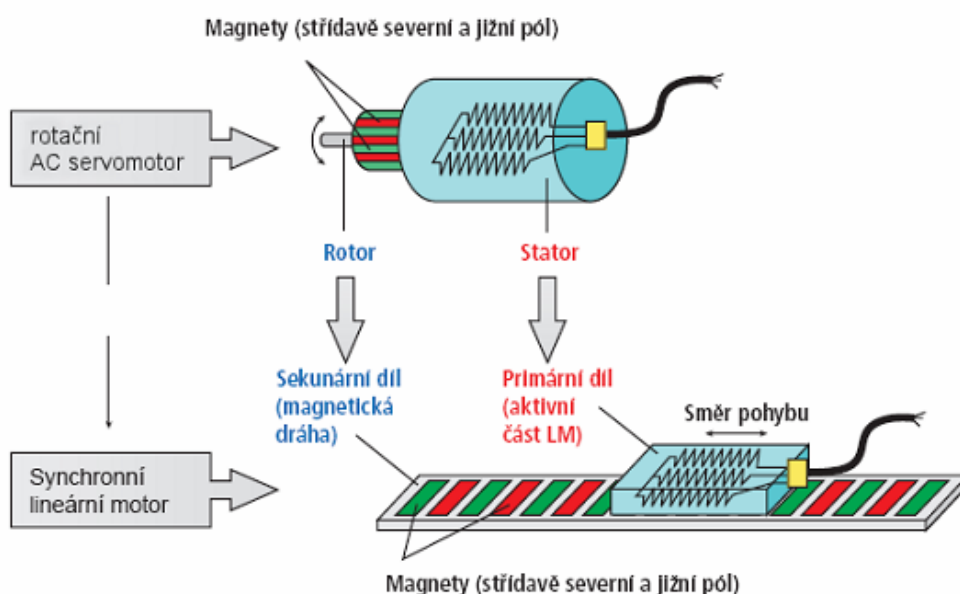
pohyblivě uložena, pohybuje se kotva s posouvajícím magnetickým polem. Je-li naopak pohyblivý induktor a kotva upevněná, pohybuje se induktor v opačném směru než postupné pole [11]. Konstrukce asynchronního lineárního motoru je znázorněna na obr. 7.



Obr. 7: Asynchronní lineární pohon [11]

2.2.2 Synchronní lineární pohony

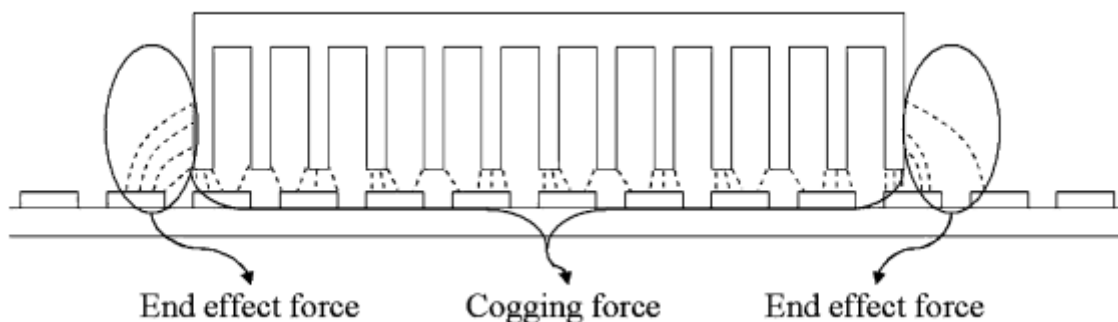
Jedná se většinou o synchronní motory s vinutím na primární části buzené permanentními neodymovými (Nd-Fe-B) magnety se špičkovými magnetickými parametry, které jsou součástí sekundární části. Motory jsou většinou uzpůsobeny pro napájení z vektorově řízených měničů kmitočtu. Zvláštním typem synchronních lineárních motorů je motor s primární částí bez feromagnetických materiálů. Primární díly těchto motorů neobsahují feromagnetické materiály. Vyznačují se především nízkou hmotností, absencí pulsací tažné síly, prakticky nulovými přitažlivými silami mezi primárním a sekundárním dílem a vysokou efektivitou. Díky těmto vlastnostem je lze vhodně použít v aplikacích náročných na rychlost posuvu, akceleraci a přesnost. Pro jednoduchost, můžeme představit synchronní lineární elektromotor jako rotační motor rozříznutý a rozložený do roviny [10]. Tohle to je znázorněno na obr. 8.



Obr. 8 : Synchronní lineární motor [2]

2.2.2.1 Nerovnoměrnost chodu (Cogging)

U synchronních strojů se objevují tzv. parazitní přídržné síly, které jsou vyvolány působením hran permanentních magnetů primárního dílu a zubů sekundárního dílu. Když je napájen primární díl a cívkami prochází proud, tyto parazitní síly působí v stejném směru, jako přitažlivá síla mezi primárním a sekundárním dílem. U lineárního motoru s krátkým primárním dílem se navíc objevují podélné okrajové (či koncové) efekty (obr. 9). Souhrn těchto jevů zhoršuje vlastnosti lineárního motoru, zejména co se týče generování tažné síly ve směru pohybu a účinnosti. Dále způsobuje nerovnoměrnost chodu (cogging) a tím ovlivňuje přesnost řízení pohonu. Zároveň s nepravidelnostmi ve vzduchové mezeře způsobují též mechanické vibrace a hluk [12] [13].



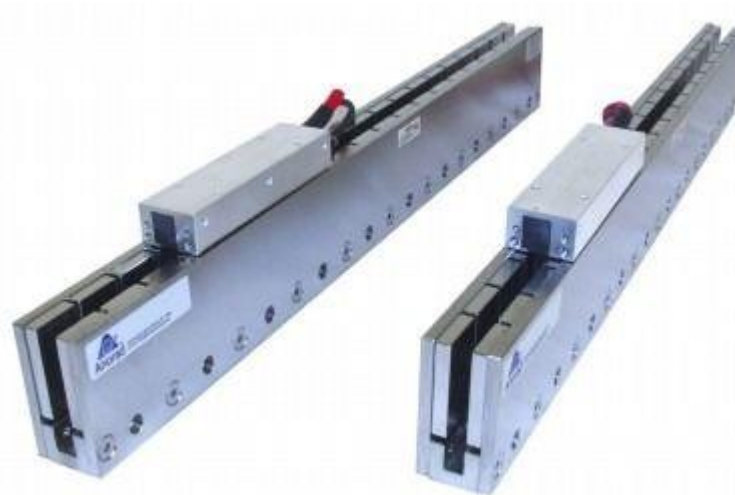
Obr 9: Působení parazitních přídržných sil [13]

Protože tento jev ovlivňuje přesnost pohybu stroje, pro vyřešení těchto problémů jsou vyvinuty metody kompenzací např.:

- Použití zaoblených magnetů
- Rozmístění magnetů pod úhlem vzhledem k vinutí
- Návrh optimální délky jezdce
- Návrh optimálního uspořádání motoru.

2.2.3 Bezželezný lineární pohon

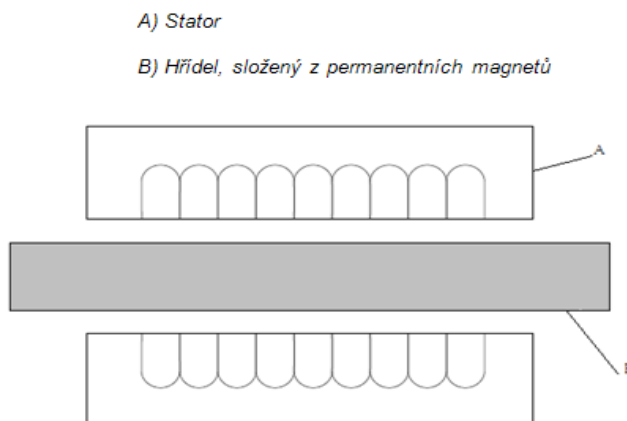
Na rozdíl od přímého synchronního lineárního pohonu bezželezný pohon neobsahuje v primární části žádné magneticky aktivní železo, má uložené cívky v nemagnetickém nosiči. Tato konstrukce zachovává všechny výhody běžného lineárního pohonu a eliminuje některé jeho negativní vlastnosti. Na rozdíl od lineárních pohonů jsou vhodné pro pohon zařízení s malou hmotností, ale vysokou dynamikou. Umožňují dosahovat velkých rychlostí a zrychlení, taky jsou vhodné pro přesné polohování (bez překmitu). U bezželezných pohonů mezi pohyblivou a nepohyblivou částí nevzniká žádná přitažlivá síla, která u pohonů s železem několikanásobně převyšuje maximální posuvovou sílu (tzn., že je vymezen cogging.). Tento typ pohonu má také nízké provozní náklady, díky velké účinnosti. Nevýhodou je horší odvod tepla, což znamená i menší přípustné trvalé zatížení [14]. Příklad bezželezného lineárního motoru je znázorněn na obr. 10.



Obr. 10 : „Beželezný“ lineární pohon [15]

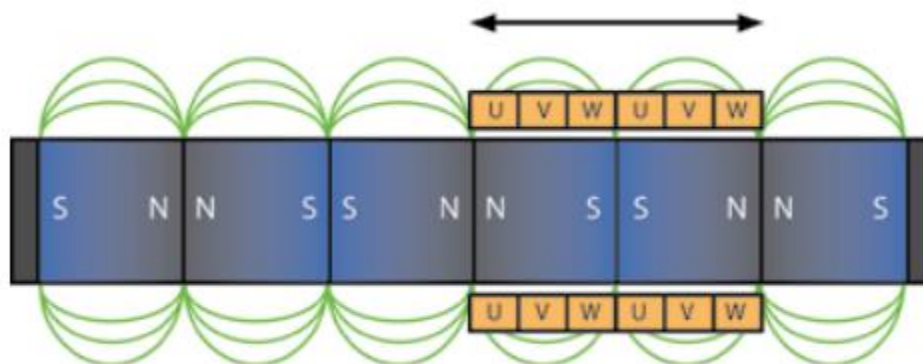
2.2.4 Tubulární lineární motor

Princip činnosti tubulárního lineárního motoru, který je použit v této práci, je založen na principu elektromagnetického systému (obr. 11). Tento systém se skládá z ocelové obálky, složené z permanentních magnetů a vinutí na statoru. Při napájení vinutí proudem se obálka začne pohybovat. Pomocí změny polarity signálu můžeme řídit směr pohybu.



Obr. 11. Schéma elektromagnetického systému [16]

Podobná konstrukce zajišťuje matematicky ideální orientace magnetického pole mezi vinutím statoru a hřídelem. Všechny magnetické silové čáry svírají s vodičem úhel v 90° (obr. 12). Tato orientace umožňuje zvýšit vyvozovanou sílu a zvýšit účinnost. Tímto způsobem byla snížena pracovní teplota, která zvyšuje počet pracovních cyklů a snižuje opotřebení a navíc tohle ten pohon nepotřebuje mazivo.

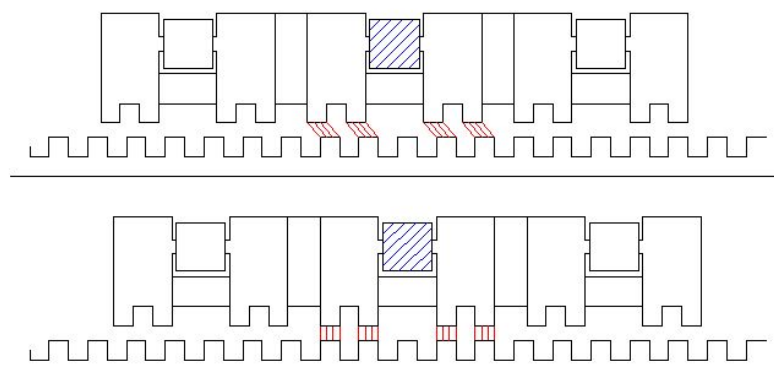


Obr. 12: Orientace magnetického pole tubulárního motoru [6]

Další výhodou je nižší poměr hluku, než u jiných typu konstrukci (např., než u pohonu s kuličkovým šroubem). Díky tomu, že v této konstrukci nejsou použity žádné mechanické převody, tento pohon má větší životnost. To například znamená že, při vyřešení problémů přesného řízení polohy za vysokých rychlostí a při nízké zátěži, má tento typ servomotoru větší životnost, než motor s kuličkovým šroubem. Další výhodou tohoto motoru je dobrá dynamika. Technicky tato konstrukce umožňuje polohovou přesnost do 120 μm [6] [16].

2.2.5 Krokové lineární motory

Krokové motory jsou používány jako výkonové prvky ve strukturách elektrických pohonů a slouží k nastavování polohy a rychlostí bez zpětné vazby. Jejich oblast použití se protahuje od jednoduchého pohybu od jednoho bodu do druhého až k přesným polohovacím robotům. Nejčastěji se používají dvou a třífázové lineární krokové pohony. Princip třífázového pohonu je uveden na obr. 13. Motory tohoto typu se vyznačují poměrně vysokou účinností, dlouhou životností a jsou prakticky bezúdržbové [17].

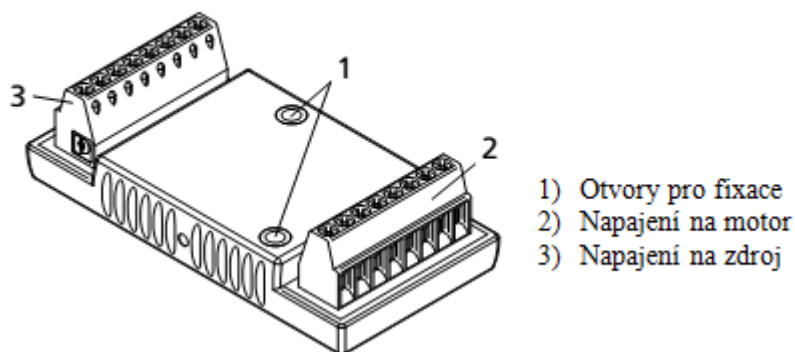


Obr. 13 : Krokový lineární motor [17]

3. Faulhaber LM-2070

Práce se zabývá řízením lineárního pohonu Faulhaber LM-2070. Poskytnutá sestava je tvořena motorem LM-2070 se zdvihem 40 mm s integrovaným analogovým snímačem polohy a řídicí jednotky MCLM3002 S CF (obr. 14).

3.1 Řídicí jednotka MCLM3002 S CF



Obr. 14: Řídicí jednotka MCLM 3002 S CF [18]

Táto řídicí jednotka je schopna plnit následující funkce [18]:

1. Řízení pozice s analogovým nebo digitálním řídicím zdrojem
2. Řízení rychlosti s analogovým nebo digitálním řídicím zdrojem
3. Získání referenčních značek (marks) a limitních přepínačů.
4. Rozšířené operační režimy, jako kontrolér napětí, kontrolér proudu.

Vstupy a výstupy mohou plnit různé funkce, jako:

Analogový vstup

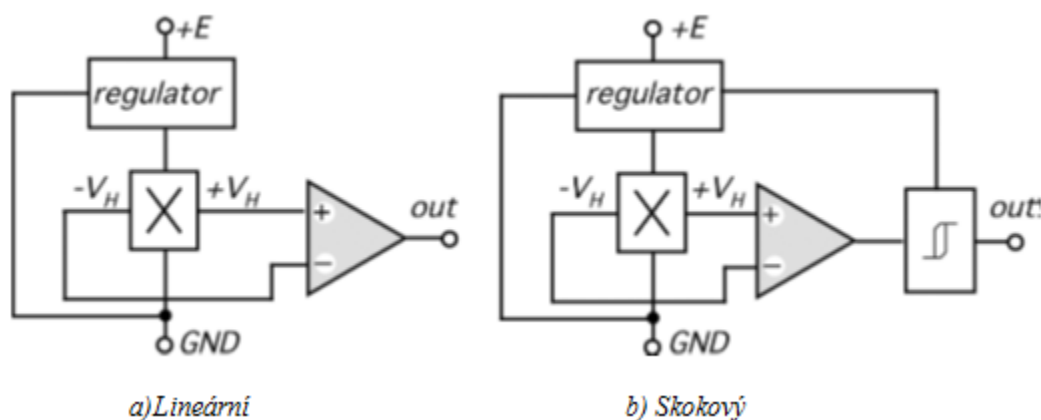
- Pulzní vstup
- Připojení pro inkrementální enkoder
- Příkazový zdroj (Command source)
- Digitální vstup

Error výstup

- Digitální výstup
- Pulzní výstup
- Digitální vstup (Digital input for)
- Rotational direction vstup

Pro danou úlohu je tato jednotka využita pro řízení pozice a rychlosti tubulárního motoru.

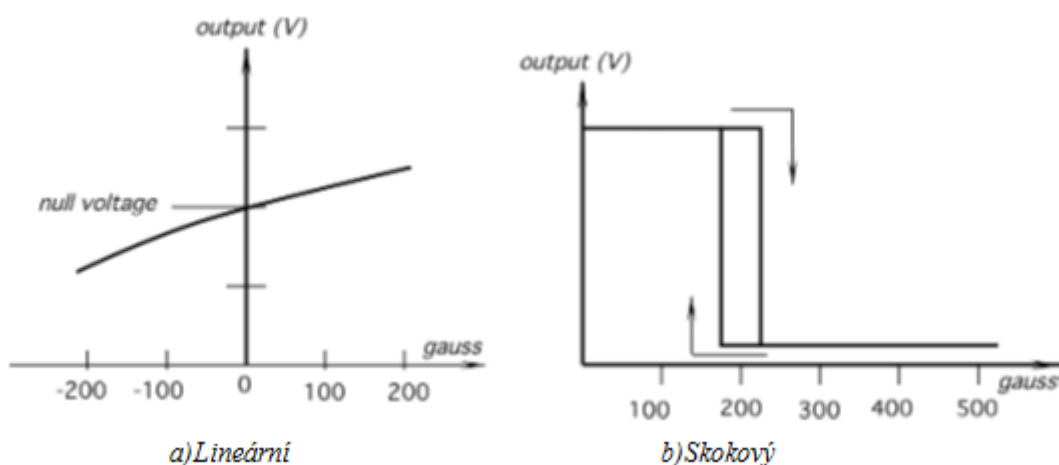
3.2 Hallové Snímače



Obr. 15. Schéma Hallových snímačů[19]

Během posledních let získaly Hall snímače významnou popularitu. Jak je patrné z názvu, tyto snímače využívají Hallův jev. Nejvyužívanější jsou dva typy Hallových senzorů: lineární a skokové. Lineární sensor (obr. 15a) obsahuje zesilovač z důvodu jednodušší interakce z obvody periferií. V porovnání se běžnými sensory, lze tyto snímače provozovat na vyšším napětovém rozsahu a mají větší stabilitu v zarušeném prostředí. Kvůli indukci elektromagnetického pole nejsou úplně lineární, proto při přesném měření je nutno provést kalibraci.

Na rozdíl od lineárního, skokový senzor (obr. 15b) kromě zesilovačů obsahuje i Schmidtův klopný obvod s hysterezí. Výstupní signál je znázorněn na obr. 16b. Je vidět, že signál má dvě úrovně a jasně viditelnou hysterezi, která je vyvolána magnetickým polem. Když působící magnetická indukce narazí na stanovenou hranici, obvod se přepne z polohy „Vypnuto“ do polohy „Zapnuto“. Hystereze eliminuje parazitní kmitý pomocí tzv. mrtvé zóny, ve které jakákoliv akce po překročení hraniční hodnoty je zakázána [19].



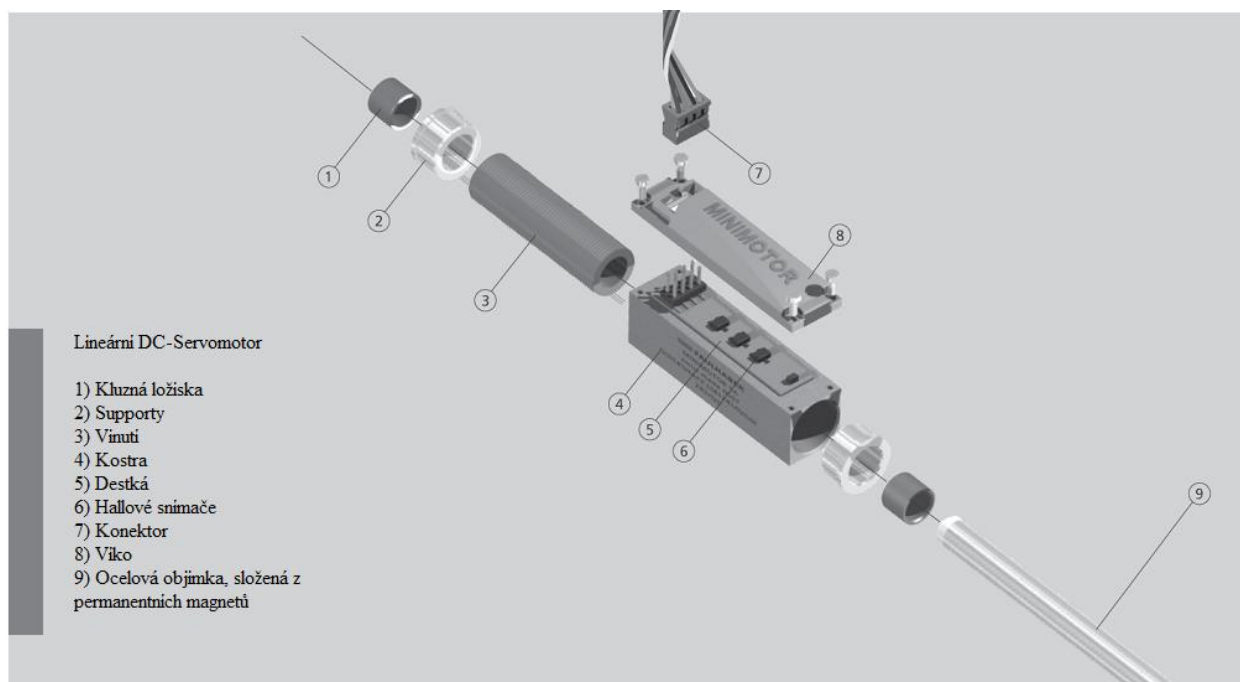
Obr. 16: Funkční závislost Hallových snímačů [19]

Pro měření pozice a posuvu Hall sensory je potřeba zdroj magnetického pole a elektrický obvod. Pro řešení této práce jsou použité analogové Hallové senzory integrovány v pohonu.

3.3 Uspořádání LM-2070

Jak už bylo popsáno dříve, v této práci je použit tubulární lineární motor, který má následující uspořádání:

Samotný motor je umístěn v nemagnetickém jezdcí, který je vyroben z nemagnetické oceli. Třífázové vinutí se nachází uvnitř jezdcí spolu s kluzným ložiskem, a to je vyrobeno z polymeru. Dalším elementem je hřídel, která je vyrobena ze stejného materiálu jako kotva a má tvar dutého válce, uvnitř kterého jsou naskládány permanentní magnety ve formě tablet. Toto umožňuje využití integrovaných Hallových snímačů umístěných na desce spolu s konektorem [20]. Konstrukce je znázorněna na obr. 17.



Obr 17. Uspořádání motoru Faulhaber LM-2070 [20]

Životnost motoru závisí na životnosti ložisek, která je závislá na podmínkách vnějšího prostředí (teplota, vlhkost), rychlosti a zátěži hřídele.

4. CANopen

Protokol CANopen je real-time protokol vyvinutý pro automatizaci. Je postaven na sériové sběrnici CAN (Controller Area Network), která byla vyvinuta firmou Bosch pro automobilový průmysl. Standard sběrnice CAN definuje transportní a fyzickou vrstvu a CANopen definuje aplikační vrstvu (znázorněné šedou barvou na obr. 18). Je to protokol typu multi-master, kde každý uzel může řídit chování ostatních uzlů. Komunikace mezi uzly probíhá pomocí zpráv.



Obr. 18: Vrstvy, které jsou podporovány protokolem CANopen [21]

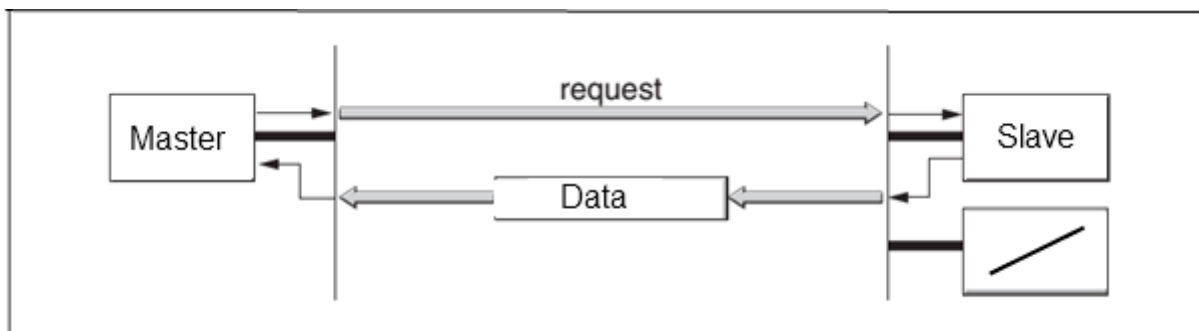
4.1 Typy komunikace

Při vyřešení úloh dané práce jsou použité následující typy komunikace [21]:

1. Master – slave (Multi-master)
2. Producer – consumer
3. Klient – server

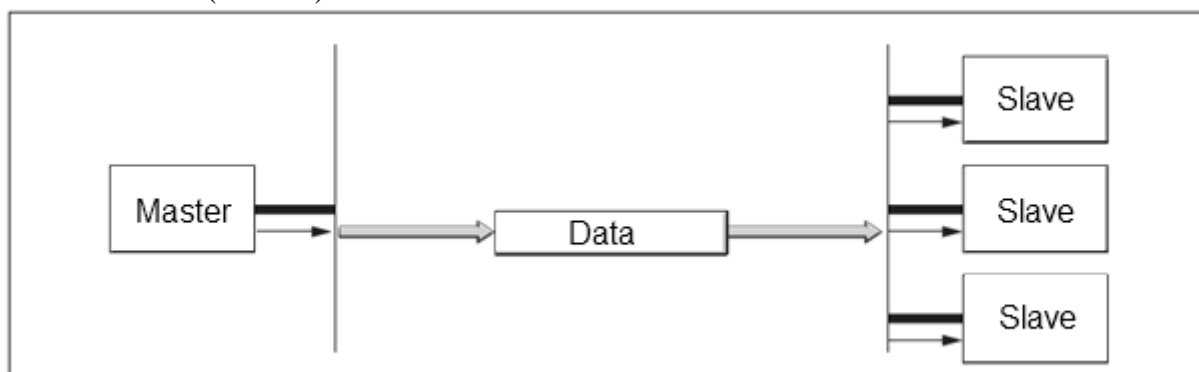
4.1.1 Master-slave

Master kontroluje vysílané zprávy. Slave odpovídá jenom tehdy, když přijme žádost od masteru. Tento typ komunikací je použit objektem „Node Guarding Object“ na kontrolované spouštění sítí a na ověření připojených zařízení (obr. 19).



Obr.19: Kominikace Master-Slave s kontrolou vysílaných zprav [21]

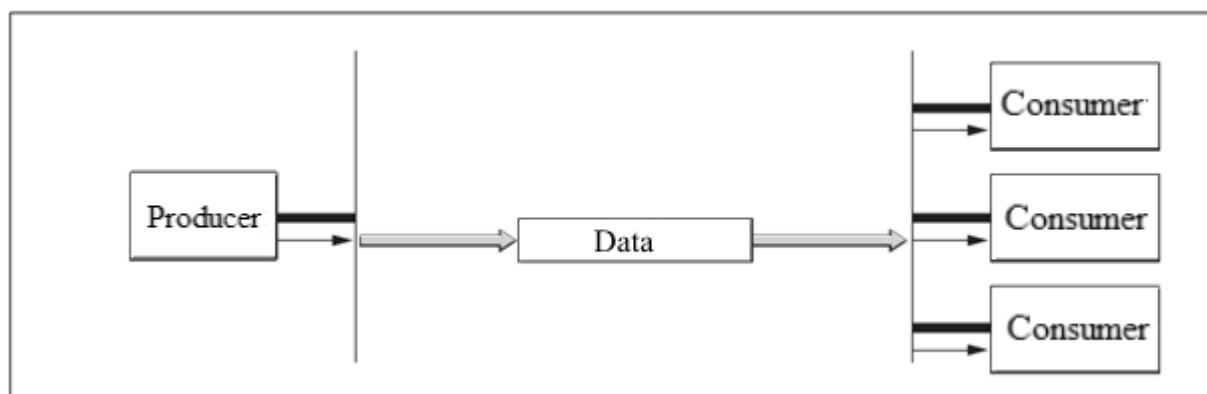
Výměna zprávy může být prováděna s a bez potvrzení. V případě, že master vysílá data bez potvrzení, tato zpráva může být přijata jakýmkoliv počtem Slave (jedním, několika, nebo žádným). Pro potvrzení zprávy master potřebuje odpověď od specifikovaného Slave, který vysílá požadovaná data (Obr. 20).



Obr. 20: Komunikace Master Slave bez potvrzení [21]

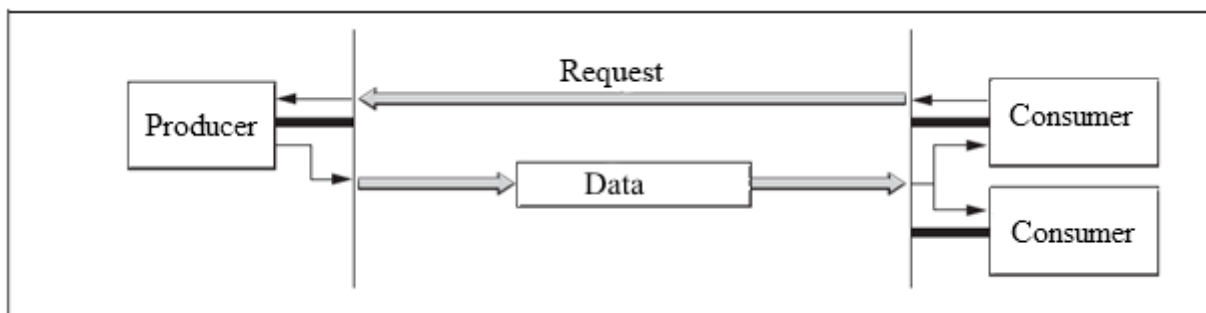
4.1.2 Producer-consumer

Komunikace typu producer-consumer je používána pro výměnu zpráv s procesními daty. Tato komunikace umožňuje rychlou výměnu dat. Jak je vidět na obrázku, producer vysílá data spotřebitelům. Existují dva typy modelů - push a pull.



Obr. 21: Komunikace Producer-Consumer, push model [21]

Push model je charakterizován tím, že producer nepotřebuje potvrzenou žádost od consumerů.



Obr 22 Komunikace Producer-Consumer, pull model [21]

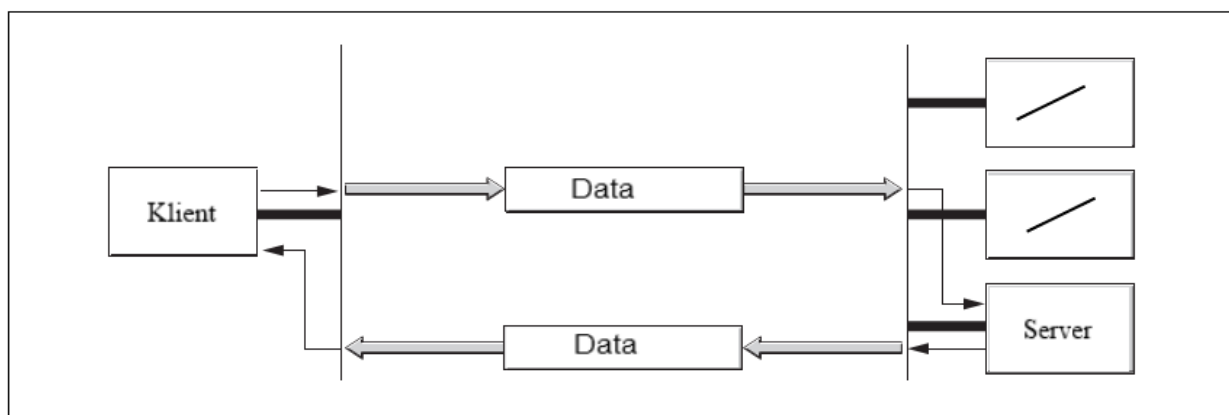
Pull model je opačný – consumer vyžaduje potvrzení žádostí od produceru. Oba tyto způsoby jsou znázorněny na obr. 21 a obr. 22.

Vysílání zprávy může být provedeno pomocí:

- Vnitřní událostí (například, při dosažení požadované polohy)
- Synchronizačním objektem SYNC
- Požadováním od consumerů

4.1.3 Klient-server

Tento typ komunikace je používán mezi dvěma zařízeními. Jako server je považované zařízení, u kterého je použit během komunikace slovník objektů. Klient adresuje a začíná výměnu zprávou a čeká na potvrzení serveru (obr 23). Tento typ komunikace je používán při komunikaci pomocí SDO objekty a výměně dlouhých zpráv (větších, než 4 bajty).



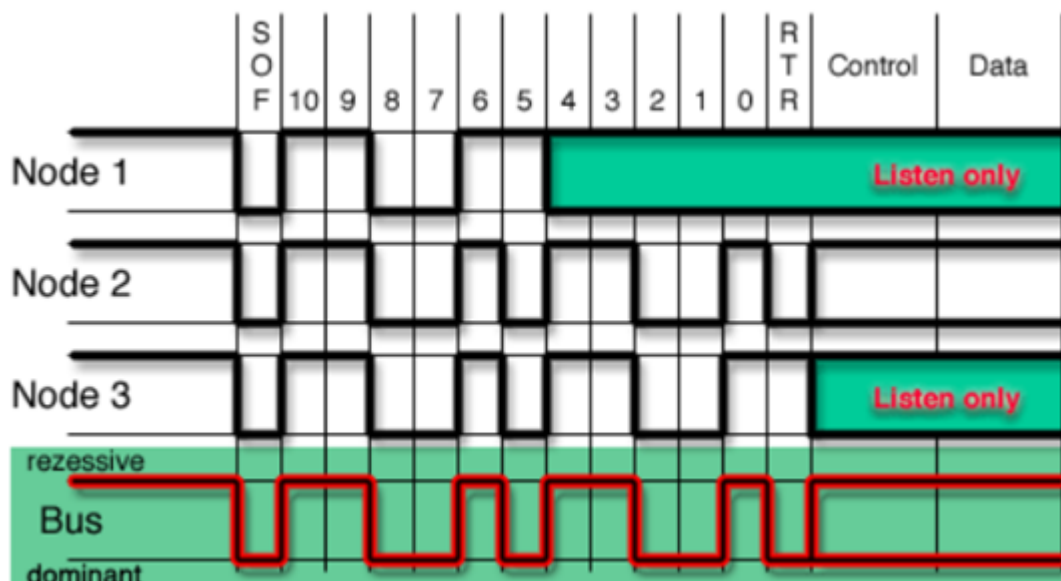
Obr 23: Komunikace Klient-Server [21]

4.2 Vysílání dat v reálném čase

Při komunikaci v reálném čase hraje důležitou roli prioritizace vysílaných zpráv, která se může lišit podle typu zprávy. Například změna zátěže je důležitější než ostatní, např. teplota motoru, a musí být vysílána častěji.

Priorita, s kterou je zpráva vysílána, je specifikovaná identifikátorem u každé zprávy. Je definovaná systémem a představuje binární hodnoty, které nemohou být změněny dynamicky. Identifikátor s nižší hodnotou má větší prioritu. Problémy s přístupem ke sběrnici jsou vyřešeny pomocí bitové arbitrace, která sleduje prioritu každého uzlu bit po bitu. Tyto uzly mohou mít recesní nebo dominantní bity, jejich počet monitoruje „Arbitration field“. Toto se objevuje při přeposílání dat několika uzly – data přeposílá ten, který má větší počet dominantních bitů v identifikátoru, ostatní uzly se přepínají do stavu „poslouchá“ (obr 24). Zjistí-li uzel, že vysílá

recesivní bit a na sběrnici je bit dominantní, okamžitě přestává vysílat. Tímto způsobem je zabezpečeno, aby přístup k přenosovému kanálu se dostal ten, jehož zpráva má nejvyšší prioritu. Současně je zabezpečeno, aby při nárůstu zatížení sběrnice nedošlo ke snížení přenosového výkonu sítě [22].



Obr 24: Výměna dat v reálném čase [22]

4.2.1 Typy a struktura datových rámců

Komunikační protokol CANopen definuje formát přenášených zpráv na aplikační úrovni. Zprávy jsou přenášeny v tzv. rámcích [22] [23]. V definici CANopen jsou určeny čtyři typy rámců:

- Datový rámeček (Data frame)
- Žádost o data (Remote frame)
- Chybový rámeček (Error frame)
- Rámeček přetížení (Overload frame)

Ty jsou popsány v dalších kapitolách.

4.2.1.1 Datový rámeček

Datový rámeček, který je znázorněn na obr. 25, se začíná tzv. Start Of Frame“, který úvodní jednobitové pole s dominantní hodnoty. Za tím následuje arbitrážní pole (Arbitration Field), které se skládá z identifikátoru a RTR (Remote Transition Request) bitu, které jsou použity na identifikaci a ověření, že se jedná o datový rámeček nebo o žádost o vysílání. Pak následuje řídicí pole, které obsahuje IDE (IDentifikator Expression) bit pro rozlišení základního a rozšířeného formátu, reverzní bit a 4 bity DLC (Data Length) určující počet bytů datového pole (0 až 20). Malá délka tohoto pole je způsobená záměrem dané sběrnice na zabezpečení rychlého přenosu zpráv s vysokou prioritou. Delší bloky dat je nutno segmentovat v aplikační úrovni. Všechna data na sběrnici jsou dostupná všem uzlům současně. Dalším prvkem je datové pole o velikosti 0 až 8 bitů. Dál následuje CRC pole, které nese 15 kontrolních bitů cyklického redundantního kódu při zahrnutí všech předcházejících polí. Je ohraničeno recesivním bitem ERC (End of CRC). Potvrzující pole (ACKnowledge field), které následuje po CRC, sestává z bitů ACK slot a ACK limiter. ACK slot bit je vysílán jako recesivní. Pokud alespoň jeden uzel přijal zprávu bez chyby, tento bit se přepíše na dominantní, čímž oznámí vysílači, že zpráva byla přijata. Konec

rámce (End Of Frame) se skládá z nejméně sedmi recesivních bitů, za nimiž následují nejméně 3 bity pro uklidnění všech vysílačů. V této době mohou přijímací uzly informovat vysílací uzel o chybách přenosu. Každá jednotlivá zpráva je oddělená od jiné pomocí 3 bitových mezilehlých polí a uklidněním sběrnice (Intermission field, Bus Idle) .



Obr. 25: Datový rámec [22]

4.2.1.2 Žádost o data (Remote frame)

Žádost o rámec má obdobný formát jako datový rámec. Neobsahuje však datové pole a bit RTR je recesivní (v datovém rámci je dominantní). Uzel takto žádá některý jiný uzel na síti o vysílání datového rámce se shodným identifikátorem, jaký je v žádosti.

4.2.1.3 Chybový rámec (Error frame)

Chybový rámec sestává z polí Error Flag a Error Delimiter. Uzel, který zjistí chybu v řetězci přijímaných bitů, začne vysílat 6 dominantních bitů, čímž poruší strukturu rámce. Ostatní uzly začnou též vysílat 6 dominantních bitů. Celková délka Error Flag může být 6 až 12 bitů. Za nimi následuje pole Error Delimiter s 8 recesivními bity.

4.2.1.4 Rámec přetížení (Overload frame)

Rámec přetížení má obdobnou strukturu, jako chybový rámec. Uzel vyšle tento rámec především tehdy, když potřebuje určitý čas na zpracování předchozí zprávy.

4.3 Detekce a korekce chyb

Na rozdíl od ostatních sběrnic, protokol CANopen nepoužívá potvrzovací zprávy (acknowledgement messages), místo toho signalizuje chybový stav. Pro detekci chyb CANopen používá tři mechanismy na úrovni zpráv (linková vrstva podle referenčního modelu OSI/ISO):

- Cyklický redundantní součet (CRC): CRC chrání informace v rámci pomocí přidání tzv. kontrola posloupností rámců (frame check sequence, FCS) na konec zprávy. Přijímač spočítá tuto posloupnost a porovná s přijatou. Případ, kdy spočítaná posloupnost se liší od přijaté znamená, že došlo k chybě CRC.
- Ověření rámců (Frame check): tento mechanismus ověřuje strukturu přесílaného rámce pomocí porovnání bitových polí s předepsanou hodnotou a kontroly rozměru rámce. Chyby detekované tímto způsobem jsou značeny jako „chyby formátu (format errors)“.
- Chyba potvrzení (ACK error): Uzel přijme zprávu, která obsahuje informaci o přijatých rámcích. V případě, že tato zpráva nebyla přijata, je indikovaná chyba potvrzení (ACK error).

V protokolu CAN se taky používají dva mechanismy detekce chyb na bitové úrovni (fyzická vrstva podle referenčního modelu OSI/ISO):

- Monitorování: Schopnost vysílače detekovat chyby je založena na sledování signálu sběrnice. Každý uzel, který vysílá informaci, má také přiřazenou úroveň na sběrnici, což umožňuje detekovat rozdíly mezi vyslanými a přijatými bity. toto umožňuje snadno detekovat globální chyby a taky chyby v okolí vysílače.
- „Bit-stuffing“: Kódování každého bitu je testováno zvlášť. V síti CAN je použit princip „Non Return to Zero (NRZ)“. Znamená to, že po pěti stejných po sobě jdoucích bitech vysílač vkládá do této sekvence tzv. stuff-bi, který je nevýznamný je po přijetí odstraněn.

V případě, že se objeví jedna nebo několik chyb alespoň v jednom uzlu, vysílání dat bude přerušeno tzv. chybovým rámcem („error frame“). Toto zabraňuje přijetí dat ostatními uzly a zajišťuje konzistenci dat v celé síti. Po přenosu chybové hlásky, vysílač automaticky restartuje výměnu dat v síti a uzly jsou schopny posílat data [22].

4.4 Identifikátory protokolu CANopen

Každý komunikační objekt může mít jeden nebo více identifikátorů, které definují jeho prioritu na sběrnici. Protokol CANopen definuje výchozí hodnoty identifikátorů pro všechny povinné objekty. To slouží k usnadnění návrhu jednoduchých sítí. Tyto hodnoty se nastavují v předprovozním stavu sítě a v případě potřeby je lze dále dynamicky modifikovat [23]. Identifikátory, které jsou používány v dané práci, jsou uvedené v tab. 1.

Object	Function code (binary)	Resulting COB-ID	Communication Parameters at Index
NMT	0000	0	–
SYNC	0001	128 (80h)	1005h

Object	Function code (binary)	Resulting COB-ID	Communication Parameters at Index
EMERGENCY	0001	129 (81h) – 255 (FFh)	1014h
PDO1 (tx)	0011	385 (181h) – 511 (1FFh)	1800h
PDO1 (rx)	0100	513 (201h) – 639 (27Fh)	1400h
PDO2 (tx)	0101	641 (281h) – 767 (2FFh)	1801h
PDO2 (rx)	0110	769 (301h) – 895 (37Fh)	1401h
PDO3 (tx)	0111	897 (381h) – 1023 (3FFh)	1802h
PDO3 (rx)	1000	1025 (401h) – 1151 (47Fh)	1402h
SDO (tx)	1011	1409 (581h) – 1535 (5FFh)	1200h
SDO (rx)	1100	1537 (601h) – 1663 (67Fh)	1200h
NMT Error Control	1110	1793 (701h) – 1919 (77Fh)	

Tab. 1: Identifikátory CANopen [24]

4.5 Objektový slovník

Aplikační vrstva a komunikační profil v síti CANopen podporují přímý přístup k parametrům zařízení zapojených v síti a přenos časově kritických technologických dat. Síťové služby daného protokolu zjednodušují návrh systému řízení, jeho integrování a diagnostiku. Každý decentralizovaný systém řízení vyžaduje odlišné komunikační služby a protokoly. Protokol CANopen je všechny definuje a to spolu s nezbytnými komunikačními objekty obsahujícími veškeré informace o vlastnostech a funkčních schopnostech jednotlivých zařízení. Všechny komunikační objekty se nachází v slovníku objektů (Object Dictionary), který je uložen v zařízení. Toto zařízení je součástí sítě, které slouží jako rozhraní mezi samotným zařízením a aplikací. Každý komunikační objekt určitého zařízení je popsán ve slovníku objektů předepsaným způsobem v stanoveném formátu. Každý komunikační objekt je dostupný

prostřednictvím jedenáctibitového indexu, v případě objektu typu pole a záznam je doplněné osmibitovým subindexem.

Všechny komunikační objekty přítomné ve všech zařízeních v síti CANopen jsou pod týmiž indexy uloženy ve slovníku objektů. Totéž platí i pro všechny komunikační objekty tvořící tzv. standardní profil zařízení.

Slovník objektů obsahuje také rezervované indexy určené k umístění specifických informací poskytovaných jednotlivými výrobci daného typu zařízení .

4.5.1 Objekty

Pro výměnu dat v síti CANopen jsou použity objekty. Podle dokumentace [24], řídicí jednotky Faulhaber podporují následující komunikační objekty:

- 6×PDO
- 1×server SDO
- 1×SYNC objekt
- NMT (Node guarding object)
- 1×Emergency object

Ty jsou popsány v dalších podkapitolách.

4.5.1.1 Objekty pro technologická data (Process Data Object)

Komunikační objekty nesoucí technologická data (Process Data Objects – PDO) jsou přenášeny v jedné CAN zprávě s využitím od třech do osmi bajtů v poli dat. Každý PDO má unikátní identifikátor CAN a je vyslán pouze jediným uzlem sítě, přičemž může být přijat libovolným počtem zařízení. Jde tedy o způsob komunikace známý jako producer/consumer, který byl popsán v kapitole 4.1. Vyslání zprávy s PDO může být inicializováno vnitřní událostí, vnitřním časovačem, požadavky vznesenými jinými zařízeními v síti nebo přijetím synchronizační zprávy (Sync Message – SYNC).

11 bit identifier	3 to 8 byte user data							
0x380 (896D) + Node-ID	Data0	Data1	Data2	Data3	Data4	Data5	Data6	Data7

Tab. 2: Struktura PDO[24]

Řídicí jednotka Faulhaber podporuje dva typy PDO: TPDO (Send PDO) a RPDO (Receive PDO). RPDO obsahují řídicí data, TPDO obsahují kontrolní (monitoring) data. Struktura těchto objektů je znázorněná v tab. 3 a tab. 4.

11 bit identifier	2 bytes user data	
0x180 (384D) + node ID	LB	HB

Tab. 3: Struktura TPDO[24]

11 bit identifier	2 bytes user data	
0x200 (512D) + Node ID	LB	HB

Tab. 4: Struktura RPDO[24]

4.5.1.2 Servisní objekty (SDO)

Objekty, nesoucí servisní data (Service Data Object – SDO) nebo servisní objekty (SDO) umožňují číst a zapisovat jednotlivé položky slovníku objektů, jsou znázorněny v tab 5. Obsahují 16 bitový index a 8 bitový subindex. Řídicí jednotka funguje jako server, tedy umožňuje.

stahovat nebo posílat data po žádosti klienta. Pomocí SDO je možné přenášet objekty libovolné délky. Pro přeposílání dat větší délky, než 4 bajty, jsou použité segmenty (tab. 6).

Byte0	Byte1-2	Byte3	Byte4
Command Specifier	16 bit index	8 bit subindex	1-4 byte parameter data

Tab. 5: SDO objekt[24]

11 bit identifier	8 bytes user data							
0x600 (1536D) + Node-ID	0x40	Index LB	Index HB	Subindex	0	0	0	0

Tab. 6: SDO segment[24]

4.5.1.3 SYNC Object

Základní taktování sítě zajišťuje objekt „SYNC“, který je periodicky vysílán jedním ze zařízení. Perioda vysílání je definována ve slovníku objektů a může být nastavována konfiguračním nástrojem při uvádění zařízení do provozu. V případě, že vysílané objekty mají větší prioritu, může dojít při vysílání objektu „SYNC“ k jeho zpoždění. Objekt „SYNC“ se skládá z jedné CAN zprávy, která je znázorněná v tab. 7.

11 bit identifier	No user data
0x80	

Tab. 7: Struktura objektu SYNC[24]

4.5.1.4 Emergency object

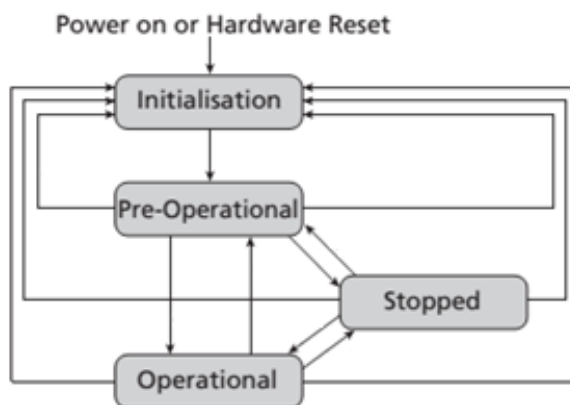
Tato zpráva je zasílána v případě vzniku závažné chyby v zařízení. Díky nízké hodnotě identifikátoru má zpráva vysokou prioritu. Informace o chybách je uložena v Error registru (0x1001). Zpráva obsahuje rezervovanou oblast pro rozšířené specifikace chyby (tab. 8).

11 bit identifier	8 bytes user data							
0x80 (128D) + Node-ID	Error0 (LB)	Error1 (HB)	Error reg.	0	0	0	0	0

Tab. 8: Emergency object [24]

4.5.1.5 NMT Control Object

Objekt poskytuje prostředky pro řízení stavu zařízení v CAN síti. Zpráva má nejvyšší prioritu díky nulovému identifikátoru. Zpráva se skládá ze dvou bajtů, z nichž první bajt je CS (Command Specifier) a obsahuje příkaz. Druhý bajt obsahuje jednoznačnou identifikaci uzlu dle Node-ID. Stavový model zařízení komunikujících podle protokolu CANopen obsahuje následující stavy: inicializace (Initialization), předprovozní (Pre-operational), pracovní (Operational) a zastaveno (Stopped). Tyto stavy jsou znázorněny na obrázku 26.



Obr. 26: Stavový model zařízení [24]

4.5.1.6 Node Guarding

Master síť periodicky monitoruje přítomnost a stav slejvu, pomocí zasílání datových žádostí s cílem zjistit, že jsou aktivní.

Slave zařízení odpovídá zprávou, která obsahuje informaci o jeho stavu a doplňkový (toggle) bit, který mění svoji hodnotu při každém dotazu. Doplňkový bit umožňuje zjistit, došla-li odpověď na aktuální dotaz.

Z odvráceného pohledu může podřízené zařízení provádět kontrolní činnost Life-guarding řídicího zařízení s využitím pravidelnosti dotazů Node-guarding. Jestliže zařízení neobdrží tento dotaz do plynutí určené doby, oznámí tuto okolnost nadřazenému aplikačnímu programu, který na ni může zareagovat.

4.6 Řízení pohonu (Dle CIA DS402)

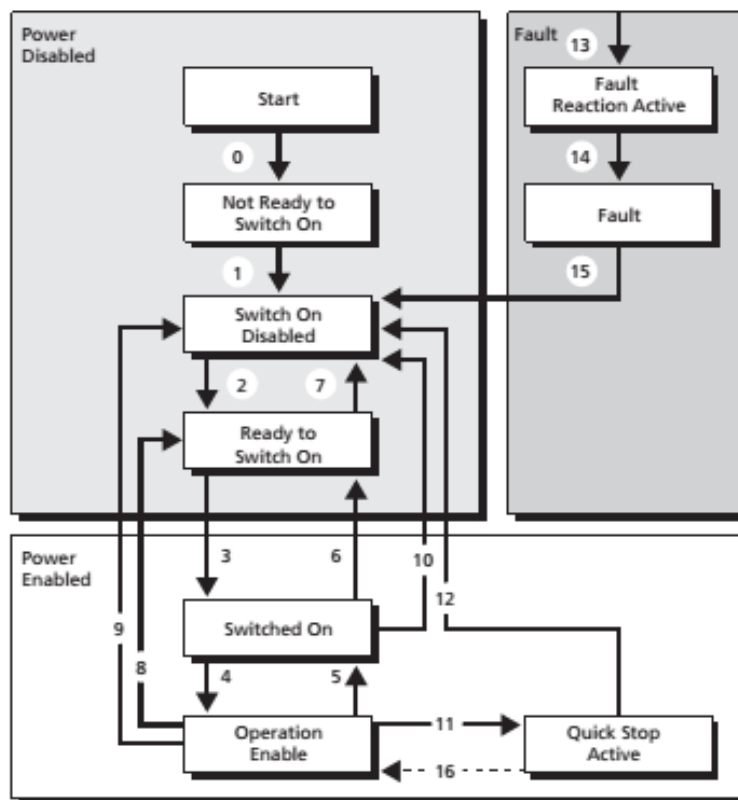
Řidiči jednotka firmy Faulhaber podporuje Device Control podle CIA 402. Podle toho můžeme používat tuto jednotku pro řízení pozice, rychlosti a na „homing mode“. Chování pohonu je popsáno dále a je znázorněno na obr. 27 [23].

4.6.1 Inicializace pohonu

Po zapnutí a inicializaci se pohon přepne do stavu „Switch On Disabled“. V stejném okamžiku automaticky probíhá změna stavu z 0 na 1.

Změna stavu nemůže proběhnout, pokud alespoň jeden z hlavních uzlů je v „Operational“ stavu.

Při použití příkazu „Shutdown“ se pohon přepíná do stavu „Ready to switch on“ (značeno 2).



Obr. 27 : Inicializace pohonu [24]

Příkaz „Switch on“ přepíná pohon do stavu „Switched on“. Pohon je teď zapnut a je schopen plnit další funkce.

Příkaz „Enable operation“ přepne pohon do stavu „Operation is enabled“, který je normálním pracovním stavem (značen 4). Příkaz „Disable operation“ se vrátí stav „Switched on“ a je použit na zastavení probíhající akce (značeno 5).

Řízení probíhá pomocí kontrolních slov (controlword). Ověření výsledku probíhá pomocí status-slov (statusword).

4.6.1.1 Controlword

Jak je patrné z názvu, controlword se používá na odeslání příkazu. Ty jsou provedeny pomocí kombinace bitů 0 – 3. Controlword je vložen v slovníku objektů pod indexem 0x6040 a je poslán pomocí PDO (tab. 9).

Index	Subindex	Name	Type	Attrb.	Default value	Meaning
0x6040	0	controlword	Unsigned16	rw	0	Drive control

Tab. 9 : Struktura controlwordu

Jednotlivé bity controlwordu jsou znázorněny v tab. 10.

Bit	Function	Commands for Device Control State Machine						
		shut-down	Switch on	Disable Voltage	Quick Stop	Disable Operation	Enable Operation	Fault Reset
0	Switch on	0	1	X	X	1	1	X
1	Enable Voltage	1	1	0	1	1	1	X
2	Quick Stop	1	1	X	0	1	1	X
3	Enable Operation	X	0	X	X	0	1	X
4	New set-point/Homing operation start							
5	Change set immediately							
6	abs/rel							
7	Fault reset							0->1
8	Halt							
9	0							

Tab. 10: Bity controlwordu

4.6.1.2 Statusword

Statusword se používá na ověření aktuálního stavu pohonu. Ten je zobrazen v bitech 0 až 6. Změnu stavu pošle řídicí jednotka pomocí PDO. Statusword je vložen v objektovém slovníku pod indexem 0x6041. Struktura je znázorněna v tab. 11.

Index	Subindex	Name	Type	Attrb.	Default value	Meaning
0x6041	0	statusword	Unsigned16	ro	0	Status display

Tab. 11: Struktura statuswordu

Jednotlivé bity statuswordu jsou znázorněné v tabulce 12.

Bit	Function	State of the Device Control State Machine							
		Not Ready to Switch On	Switch On Disabled	Ready to Switch On	Switched On	Operation Enabled	Quick stop active	Fault reaction active	Fault
0	Ready to Switch On	0	0	1	1	1	1	1	0
1	Switched On	0	0	0	1	1	1	1	0
2	Operation Enabled	0	0	0	0	1	1	1	0
3	Fault	0	0	0	0	0	0	1	1
4	Voltage Enabled	X	X	X	X	X	X	X	X
5	Quick Stop	X	X	1	1	1	0	X	X
6	Switch On Disabled	0	1	0	0	0	0	0	0
7	Warning								
8	0								
9	Remote								
10	Target Reached								
11	Internal limit active								
12	Set-point acknowledge/Speed/Homing attained								

Tab. 12: Bity statuswordu

4.6.1.3 Výběr pracovního režimu

Pro výběr pracovního režimu používáme parametr „Modes of Operation“. Pro načítání aktuálního režimu je využit prvek „Modes of operation display“. Tyto dva prvky jsou znázorněny v tab. 13.

Modes of Operation (0x6060)

Index	Subindex	Name	Type	Attrb.	Default value	Meaning
0x6060	0	modes of operation	Integer8	wo	1	Operating mode changeover

Modes of operation display (0x6061)

Index	Subindex	Name	Type	Attrb.	Default value	Meaning
0x6061	0	modes of operation display	Integer8	ro	1	Display of the set operating mode

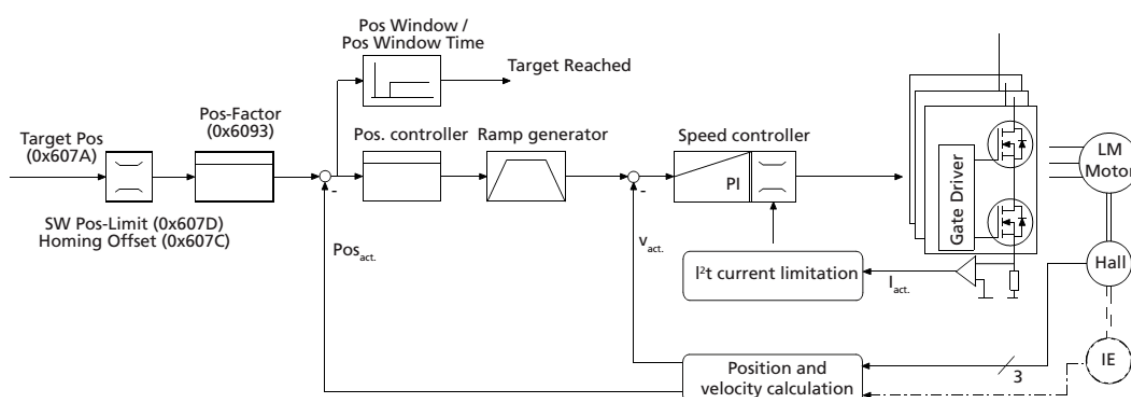
Tab. 13: Struktura objektů „Modes of Operation“ a „Modes of operation display“

Při použití řídicí jednotky Faulhaber mohou být pracovní režimy stanoveny jako:

- 1 CiA DS402 Profil polohy
- 3 CiA DS402 Profil rychlosti
- 6 CiA DS402 Homing
- 1 Faulhaber speciální pracovní režim

Kde číselná hodnota reprezentuje samotný režim v prvcích „Modes of Operation“ a „Modes of operation display“.

V této práci jsou použity režimy řízení polohy a řízení rychlosti.

4.6.2 Řízení polohy (dle CIA DS402 Profile Position Mode)

Obr. 28: Struktura regulátoru v režimu polohování

V tomto režimu je cílová poloha a nastavení regulátoru specifikováno parametry z objektového slovníku. Parametry a nastavení je popsáno dále. Struktura regulátoru je znázorněna na obr. 28.

4.6.2.1 Základní nastavení

Parametr „Modes of Operation“ musí být nastaven na hodnotu 1, který odpovídá profilu polohy podle podkapitoly 4.6. Také pohon musí být v stavu „Práce je povolena“. Parametry regulátoru jsou nastaveny pomocí objektu „Position Control Parameter Set“. Limity polohování je možné nastavit pomocí objektu „Software Position Limit“. Oba objekty jsou znázorněny v tab. 14 a tab. 15.

Software Position Limit (0x607D)

Index	Subindex	Name	Type	Attrb.	Default value	Meaning
0x607D	0	number of entries	Unsigned8	ro	2	Number of object entries
	1	min position limit	Integer32	rw	$-1.8 \cdot 10^9$	Lower positioning range limit
	2	max position limit	Integer32	rw	$+1.8 \cdot 10^9$	Upper positioning range limit

Tab. 14: Struktura objektu „Software Position Limit“

Position Control ParameterSet (0x60FB)

Index	Subindex	Name	Type	Attrb.	Default value	Meaning
0x60FB	0	number of entries	Unsigned16	ro	2	Number of object entries
	1	gain	Unsigned16	rw	Dependent on the motor type	Position controller P term
	2	D constant	Unsigned16	rw	Dependent on the motor type	Position controller D term

Tab. 15: Struktura objektu „Position Control Parameter Set“

Pro dosažení cílové polohy jsou použity dva způsoby:

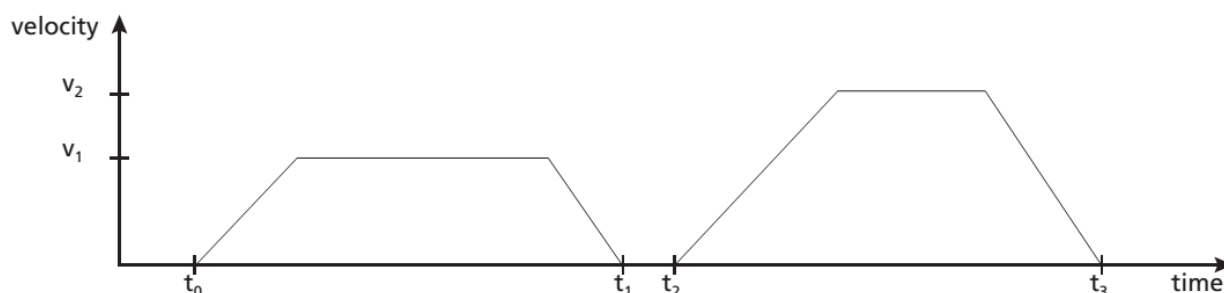
- Nastavení jednotlivými set-pointy:
Po dosažení cílové polohy vyšle pohon potvrzení, že cílová pozice je dosázená a že je schopen dosáhnout nové cílové pozice. Rychlost klesá do 0, není-li zadána nová cílová poloha.
- Sekvence set-pointů:
Po dosažení cílové pozice se pohon pohybuje dál k novému cíli, který byl poslán dříve. Toto vede k neustálému pohybu bez zastavování pohonu.

4.6.2.2 Dosažení pomocí jednotlivých set-pointů

Pro řízení pomocí jednotlivých set-pointů musí být splněné následující podmínky: Stav NMT „Operational“, stav pohonu „Operation enabled“ a prvek „Modes of Operation“ musí být nastaven na hodnotu profilu polohy (viz 4.6.1.3).

Po splnění uvedených podmínek je řízení provedeno následujícím způsobem (Obr.):

1. Cílová pozice musí být nastavená na požadovanou hodnotu.
2. V prvku „Controlword“ čtvrtý bit musí mít hodnotu 1, pátý bit se musí rovnat 0. Hodnota bitu 6 závisí na dané úloze (je-li třeba dosáhnout absolutního nebo relativního polohování)
3. Pohon odpovídá pomocí bitu 12 v prvku „Statusword“ a začíná měnit pozice (průběh $t_0 - > t_1$ a $t_2 - > t_3$ na obr. 29)
4. Při dosažení cílové polohy, pohon pošle potvrzení o dosažení polohy, pomocí bitu 10 v statuswordu. V případě, že už je zadána hodnota nového set-pointu, po ustálení pohon začne pohybovat k nové definované pozici.



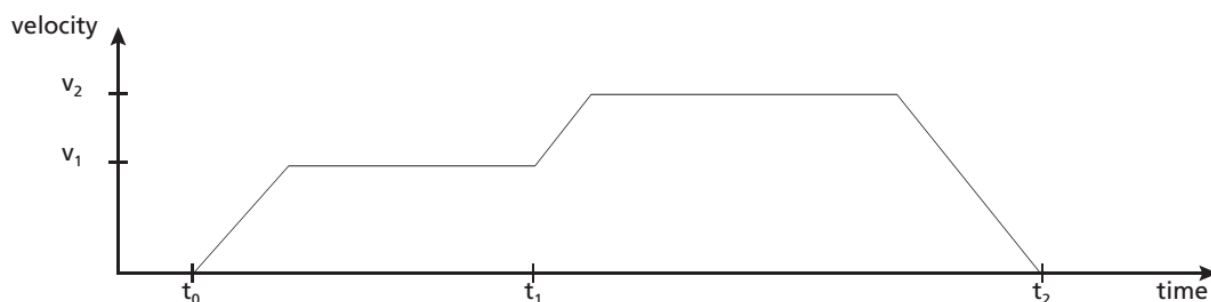
Obr 29: Dosažení cílové polohy pomocí jednotlivých set-pointů

4.6.2.3 Dosažení pomocí sekvencí set-pointů

Pro řízení pomocí sekvencí set-pointů musí být splněné stejné podmínky, jako při řízení pomocí jednotlivých set-pointů. Avšak, samotné řízení vypadá takto:

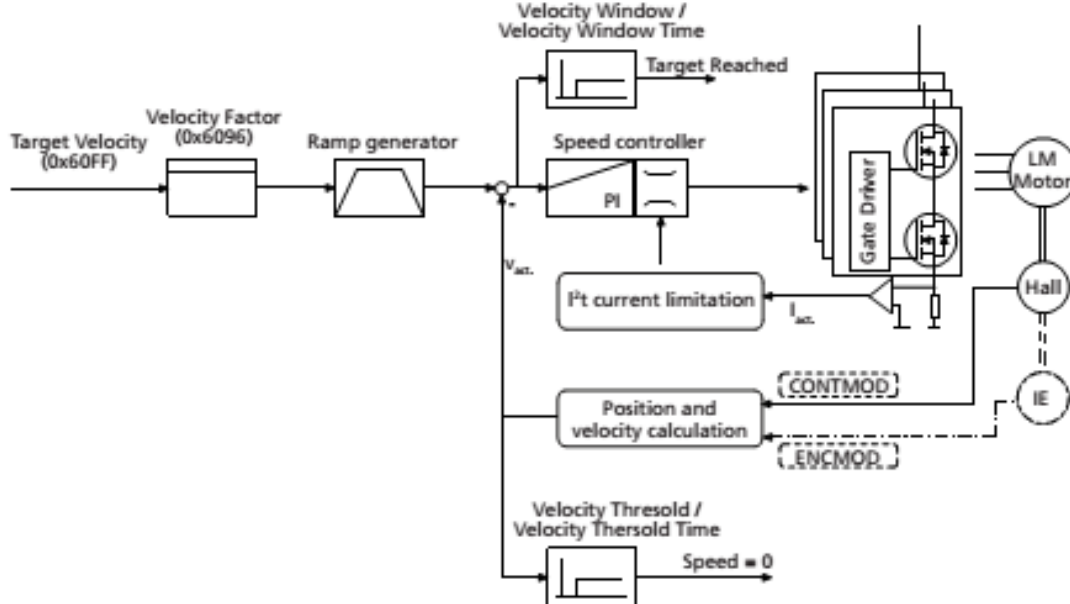
1. Cílová pozice musí být nastavená na požadovanou hodnotu

2. V prvku „Controlword“ čtvrtý bit musí mít hodnotu 1, pátý bit se musí rovnat 0. Hodnota bitu 6 závisí na dané úloze (je-li třeba dosáhnout absolutního nebo relativního polohování)
3. Pohon odpovídá pomocí bitu 12 v prvku „Statusword“ a začíná měnit pozice (průběh $t_0 - > t_3$ na obr. 30)
4. V případě, že relativní poloha nové cílové pozice je zadána, tak se přičte k poslední pozici. V daném případě se pohon nezastavuje a jede hned k nové cílové pozici (obrázky)
5. Při dosažení cílové polohy pošle pohon potvrzení o dosažení polohy pomocí bitu 10 v statuswordu.



Obr. 30: Dosažení cílové polohy pomocí sekvencí set-pointů

4.6.3 Řízení rychlosti (dle CIA DS402 Profile Velocity Mode)



Obr. 31: Struktura regulátoru v režimu řízení rychlosti

V režimu řízení rychlosti se pro řízení používá PI regulátor, jehož struktura je znázorněna na obr. 31. Za předpokladu, že pohon není přetížen, se bude pohybovat bez odchylky.

Aktuální rychlost může být změřena dvěma způsoby: pomocí vyhodnocování signálu od Hallových snímačů nebo pomocí enkoderu. V této práci budeme měřit pomocí Hallových snímačů.

Cílová rychlost je nastavitelná pomocí „Target Velocity object“ v slovníku objektů (tab. 16).

Target Velocity (0x60FF)

Index	Subindex	Name	Type	Attrb.	Default value	Meaning
0x60FF	0	target velocity	Integer32	rw	20	Target velocity

Tab. 16: Znáznornění objektu „Target Velocity object“

4.6.3.1 Základní nastavení

Stejně jako u režimu polohování je nutné nejprve nastavit parametr „Modes of Opeartion“ na hodnotu 3, což odpovídá profilu rychlosti podle podkapitoly 4.6. Také pohon musí být ve stavu „Operation enabled“.

Objekt „Velocity Control Parameter Set“ je použit na nastavení proporcionální a integrální složky regulátoru (Tab. 17).

Velocity Control Parameter Set (0x60F9)

Index	Subindex	Name	Type	Attrb.	Default value	Meaning
0x60F9	0	number of entries	Unsigned8	ro	2	Number of object entries
	1	gain	Unsigned16	rw	Dependent on the motor type	P term
	2	integration time constant	Unsigned16	rw	Dependent on the motor type	I term

Tab. 17: Objekt „Velocity Control Parameter Set“

Aktuální rychlost je určena pomocí ohodnocení signálu Hallových senzorů.

4.6.3.2 Dosazení cílové rychlosti

Řízení rychlostí probíhá pomocí nastavení set-pointů rychlostí, podobné jako u řízení polohy. Na rozdíl od řízení polohy v tomto režimu se snažíme dosáhnout cílové rychlosti. Za předpokladu, že pohon je v stavu „Operation Enabled“, motor bude zrychlen o hodnotu, která je nutná pro dosazení nové cílové rychlosti.

Dosazení cílové hodnoty je signalizováno 10 bitem statusworda, zastavení je signalizováno 12 bitem.

5. Návrh testovacího zařízení s lineárním pohonem

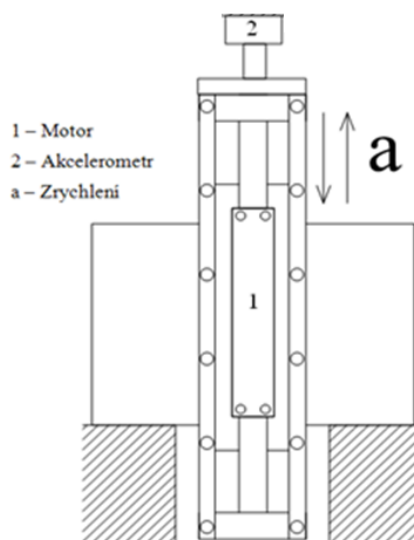
5.1 Požadované režimy testování

Cílem práce je posoudit použitelnost lineárního motoru Faulhaber LM-2070 a řídicí jednotky MCLM3002 pro dvě aplikace. První aplikací je vibrační stolek pro testování vibračních principů získávání elektrické energie a druhou aplikací je lineární aktuátor s měřením vyvozané síly.

Pro tyto účely musí být navržen testovací přípravek, který umožní realizovat požadované testy s využitím prostředků laboratoře.

5.1.1 Vibrační stolek

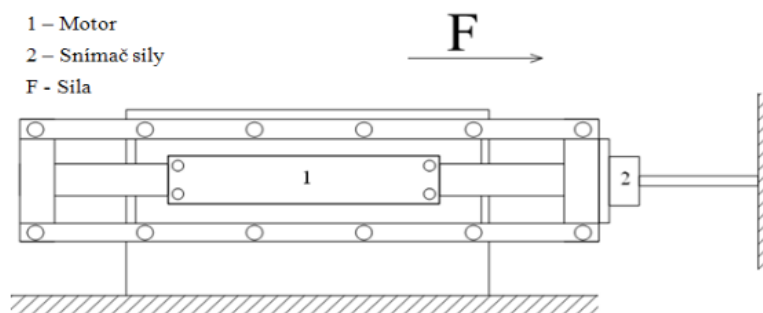
První aplikace je vibrační stolek. Motor na přípravku je orientován buď do vertikální, nebo horizontální polohy. Na kotvě motoru je připevněna upínací deska pro vibrační generátor a snímač zrychlení pro vyhodnocování pohybu. Test pro tento režim provedeme první za účelu testování dynamiky pohonu. Zjednodušené schéma této soustavy je znázorněno na obr. 32.



Obr. 32: Schematické znázornění testovacího režimu č. 1

5.1.2 Lineární aktuátor s měřením vyvozané síly

Jedná se o aplikaci testeru mechanických tlačítek, kde se kontroluje síla potřebná k sepnutí a rozepnutí tlačítka. Aktuálně používané zařízení používá pneumatický aktuátor se snímačem síly, které by bylo vhodné z provozních důvodů nahradit. Jednou z možností je použití lineárního motoru LM-2070 a spínací sílu počítat z proudu. Naším úkolem je určit přesnost tohoto způsobu měření síly.



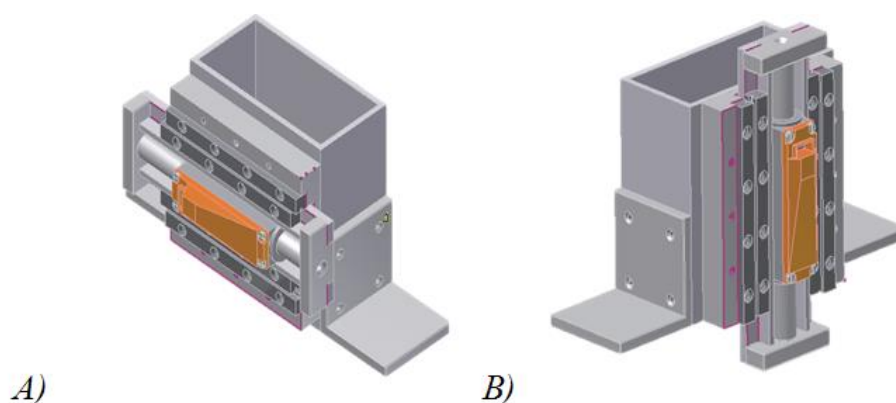
Obr. 33: Schematické znázornění testovacího režimu č. 2

Konfigurace testu je následující: motor na přípravku ve vodorovné poloze působí na snímač síly a vyhodnocuje se přesnost a opakovatelnost měření působící síly. Zjednodušené schéma je znázorněno na obr. 33.

5.2 Návrh přípravku

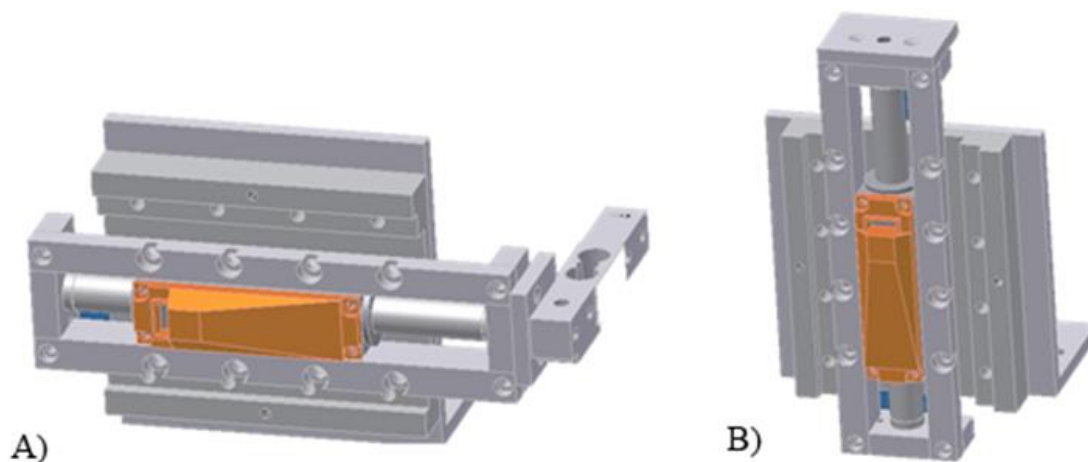
Počáteční návrh přípravku měl následující konstrukci:

Motor je umístěn na posuvné desce, která je spojena se základním tělesem pomocí čepu. Tím je umožněna změna polohy z vodorovné na svislou a naopak. Fixace je provedená pomocí šroubu (Obr. 34 A; B).



Obr. 34: Návrh testového výrobku 2: A) Vodorovná poloha, B) Svislá poloha.

Avšak kvůli nákladům na materiál a masivní konstrukci byl původní přípravek změněn na jednodušší a méně náročný. Nová konstrukce přípravku je znázorněna na obr. 35.



Obr 35. Konečná verze přípravku: A) Testovací režim č. 1, B) Testovací režim č. 2

Vyrobený přípravek je znázorněn na obr. 36. Materiálem, který byl použit pro výrobu, je dural. Samotný motor a řídicí jednotka už byly k dispozici v laboratoři.



Obr. 36: Vyrobený přípravek

5.3 Návrh software pro experimenty

5.3.1 Software pro vibrační stolek

Návrh testovacího softwaru probíhá v prostředí LabVIEW s využitím knihovny CAN. Při návrhu softwaru byla také použita standardní knihovna DAQmx (Data Acquisition) pro měření dat pomocí externích snímačů. Jak už bylo zmíněno v kapitole 5.1.1, jako první testovací režim jsme zvolili vibrační stolek.

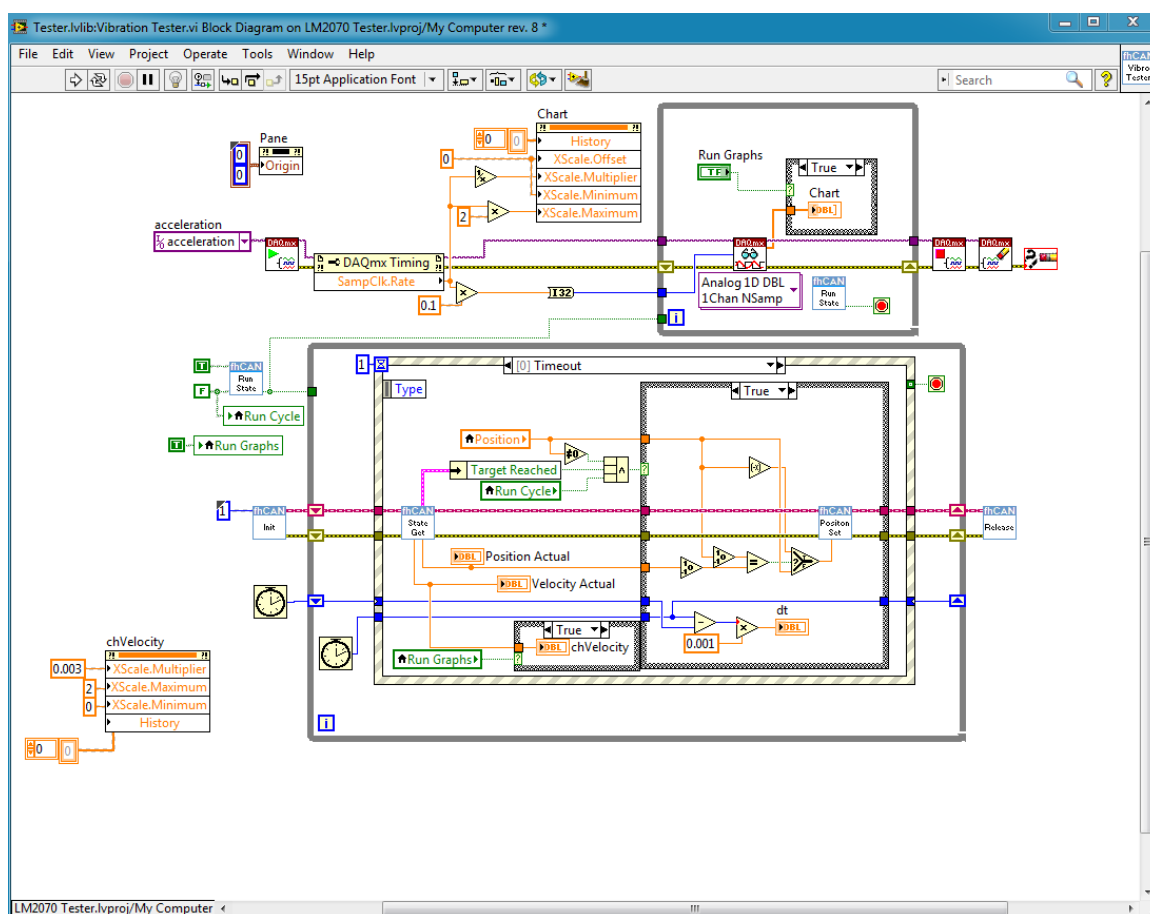
Úlohu, kterou musí řešit navrhnutý software je testování vibračních principů získávání elektrické energie. Pro vyřešení daného problému jsme navrhli program, který je založen na použití řízení rychlostí, princip kterého byl popsán v kapitole 4.6.3.

Front panel programu (obr. 37) obsahuje grafy rychlosti a zrychlení, informační elementy, které reprezentují aktuální polohu, rychlost. Dále obsahuje prvky pro řízení polohy, rychlosti a zrychlení. Je možné spouštět cyklickou změnu polohy motoru pomocí tlačítka „Run Cycle“, které usnadňuje vyhodnocení dat.

Block diagram, který je znázorněn na obr. 38, se skládá ze dvou větví. V horní větvi probíhá ohodnocování dat z připojeného akcelerometru. V dolní větvi probíhá řízení polohy.



Obr. 37: Front panel navrhnutého softwaru pro 1 testovací režim



Obr. 38: Block diagram navrhnutého softwaru pro 1 testovací režim

5.3.2 Software pro lineární aktuátor s měřením síly

Cílem experimentu je číst aktuální proud motoru (objekt 6078 dle DS402), ale použitá jednotka tento objekt nepodporuje, podporuje pouze příkaz GRC (Get Real Current), který je součástí speciálního režimu „Faulhaber“, který použité knihovny integrované v LabVIEW nepodporují. Proto bylo použito zjednodušené měření pomocí Faulhaber Motion Manager.

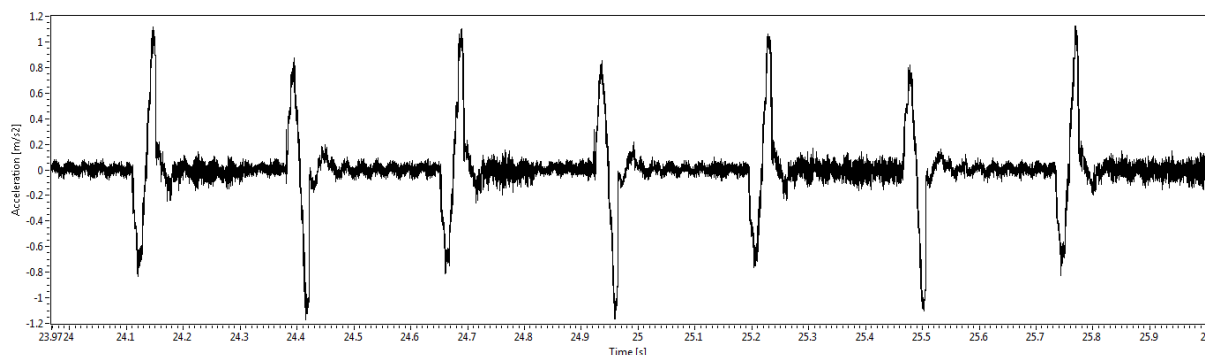
5.4 Výsledky měření

Následující kapitoly se budou věnovat vyhodnocení tubulárního lineárního motoru

5.4.1 Výsledky testu s vibračním stolem

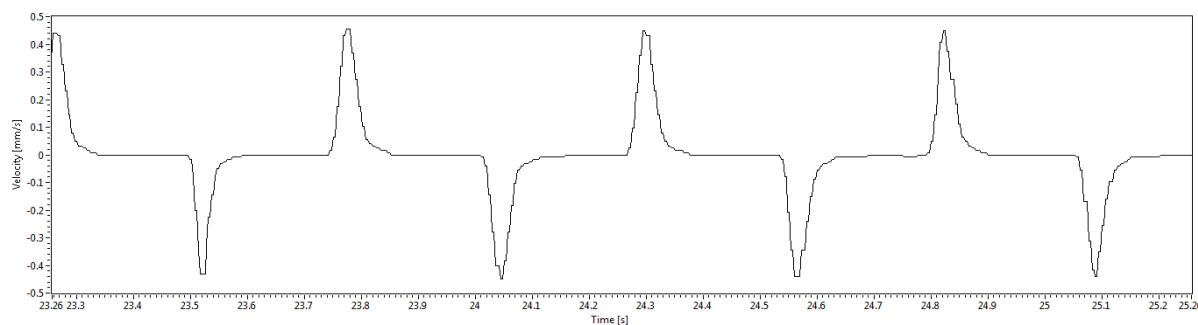
Měření probíhalo tak, že postupně byly nastavovány různé rychlosti, zrychlení a polohy. Pro každé nastavení byl v automatickém režimu spuštěn motor tak, že přejížděl \pm zadanou polohu a byla vyhodnocována dosažená rychlost, buzené zrychlení (z akcelerometru v ose pohybu motoru). Cílem bylo stanovit maximální dosažitelnou frekvenci pohybu.

Pro maximální trajektorii $\pm 20\text{mm}$, bylo při maximálním zrychlení 260mm/s^2 dosaženo rychlosti 5.1 mm/s^1 a frekvence kmitání $0,9\text{Hz}$. Při snížení délky trajektorie až na $\pm 0,1\text{mm}$ bylo dosaženo frekvence kmitání $2,1\text{Hz}$. Výsledky měření odpovídají grafům, které jsou znázorněny na obr. 39 a obr. 40.



Obr. 39: Průběh zrychlení v závislosti na čase.

Druhý graf reprezentuje závislost rychlostí na čase.



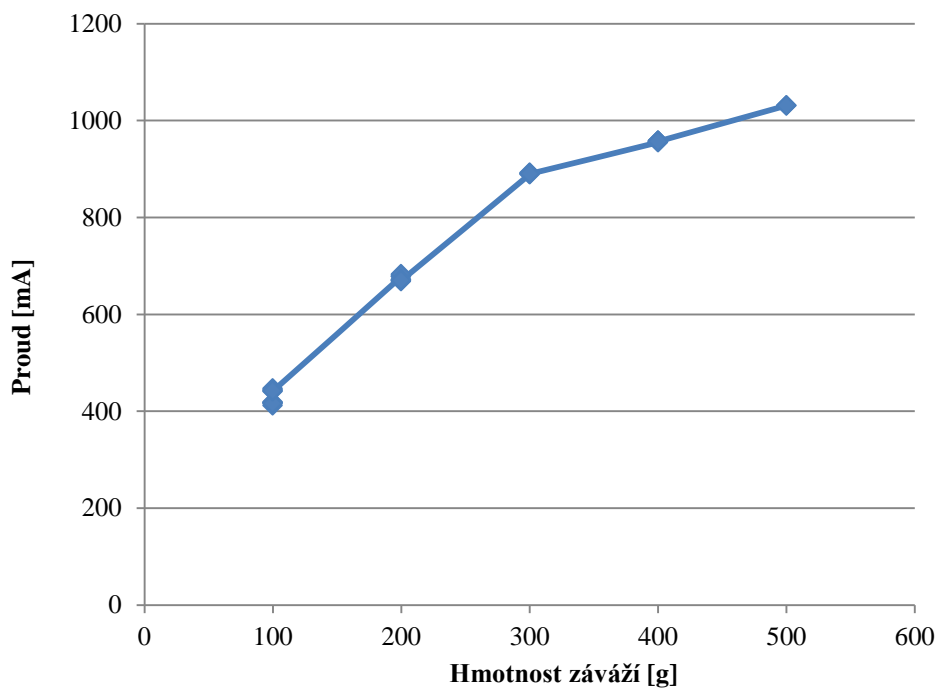
Obr. 40: Průběh rychlostí v závislosti na čase

Z měření plyne poměrně značná doba odezvy řídicí jednotky při posílání cílové polohy. Průměrná doba získání stavu aktuální rychlosti, polohy, zápisu a aktivace nové polohy trvala průměrně 3ms s použitím převodníku CAN-USB NI-8473s.

5.4.2 Výsledky testu lineárního aktuátoru s měřením síly

Měření byla provedena staticky, kdy k motoru byl připevněn snímač síly, přes který byl motor postupně zatěžován závažími 1 až 5N. Protékající proud byl měřen pomocí Faulhaber Motion Manager, výsledky jsou zobrazeny v obr. 41.

Z měření plyne, že je možné použít hodnotu proudu získanou příkazem GRC (Get Real Current) k měření zatížení ve statickém režimu. V dynamickém režimu musí být toto tvrzení ověřeno.



Obr. 41: Závislost proudu na hmotností závaží.

6. Závěr

Práce se zabývá možností použití přímých lineárních motorů Faulhaber LM-2070 v technických aplikacích. V první části práce je proveden úvod do lineárních motorů, včetně seznámení s motorem LM-2070 a řídicí jednotkou Faulhaber MCLM 3002. Následuje popis protokolu CANopen, který používá jednotka, se kterou jsou následně prováděna experimentální ověření parametrů motoru. Experimentální část práce obsahuje popis dvou typů úloh, pro které je nutné experimentálně ověřit vhodnost řešeného motoru.

Pro realizaci experimentů byl navržen testovací přípravek a software, pomocí kterého byly realizovány některé experimenty. Komunikace s řídicí jednotkou je realizována prostřednictvím protokolu CANopen s využitím třídy CANopen včetně specifikace DS402. Velmi překvapivé bylo zjištění vysoké latence jednotky v reakci na příkaz aktivace pohybu, která znemožňuje použití motoru LM-2070 pro řešení vibračního stolku. Dalším nepříjemným zjištěním byla absence podpory objektu 6078, přestože existuje ekvivalentní příkaz GRC v „Faulhaber“ modu.

Seznam použité literatury

- [1] THÜRING, Josef. Kuličkové šrouby nejenom v obráběcím procesu. *Kuličkové šrouby nejenom v obráběcím procesu* [online]. 09. Prosinec 2008, č. 11, s. 56 [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: < <http://www.technikaatrh.cz/komponenty/kulickove-srouby-nejenom-v-obrabecim-procesu> >
- [2] KAVÁN, Martin. Lineární motor versus kuličkový šroub. Lineární motor versus kuličkový šroub [online]. 2011, č. 1 [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: < <http://www.propohony.cz/linearni-motory/145-linearni-motor-versus-kulickovy-sroub> >
- [3] Speciální pohybové mechanismy. *Speciální pohybové mechanismy* [online]. 2001, č. 1 [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: < <http://www.mmspektrum.com/clanek/specialni-pohybove-mechanismy.html> >
- [4] IGUS. Šroubové pohony drylin: Závítová matice s kompenzací vůle [online]. [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: < http://www.igus.cz/wpck/7000/DryLin_Anti_Backlash_Muttern >
- [5] MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů. Speciální vydání. Průmyslové spektrum. MM publishing, 2006, ISSN 1212-2572.
- [6] ГЕРАСИМОВ, Илья. Современные тенденции в развитии линейных сервоприводов. *Sovremennyye-tendencii-v-razvitii-linejnyx-servoprivodov*. [online]. 2012, č. 3 [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: < <http://konstruktor.net/podrobnее-elekt/items/sovremennyye-tendencii-v-razvitii-linejnyx-servoprivodov.html> >
- [7] GÜDEL. *Helical tooth, Modular pitch*. [cit. 2014-05-30] Dostupné z: < <http://www.gudel.com/products/mechanical-components/rack-and-gears/racks-and-pinions/racks/p24-q5-helical-tooth-modular-pitch-hardened-and-ground/> >
- [8] Konstruování strojních součástí. Brno: VUT IUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0
- [9] KATALOG: Řetězové a řemenové převody. MATIS [online]. [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: < http://www.matis.cz/data/pdf-katalogy/Katalog%202009%20Retezove%20a%20remenove%20prevody/Retezove_remenove_prevody.pdf >
- [10] VUES Brno s.r.o., Lineární motory [online]. [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: < http://www.vues.cz/file/417/CZ_LIN-OBECNE_020909.PDF >
- [11] TKOTZ, Klaus. *Příručka pro elektrotechniku*. 2. dopl. vyd. Praha: Europa-Sobotáles. ISBN 80-867-0613-3.
- [12] ROUBÍČEK, Ota. Tendence vývoje v oblasti průmyslových elektrických lineárních pohonů. *Endence vývoje v oblasti průmyslových elektrických lineárních pohonů* [online]. 2004, č. 3 [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: < http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25741 >
- [13] SUNG, Whan Youn, Jin Lee JONG, Sung Yoon HEE a Seop Koh CHANG. A New Cogging-Free Permanent-Magnet Linear Motor. *A New Cogging-Free Permanent-Magnet Linear Motor* [online]. 2008, roč. 44, č. 7 [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: < <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04544938> >
- [14] UHER, Petr. Bezželezné lineární motory. *Bezželezné lineární motory* [online]. 2006, č. 1 [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: < http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30889 >

- [15] MACCON ., *LZ Ironless linear motors*. [cit. 2014-05-30] Dostupné z:
< <http://www.maccon.de/en/motors/linear-motors/lz.html> >
- [16] НПФ Электропривод ., *Линейные двигатели нового поколения* [online]. [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: < http://electroprivod.ru/linear_public.htm >
- [17] Střední průmyslová škola strojní a elektrotechnická a Vyšší odborná škola. *Studijní materiály* [online]. [cit. 2014-05-30]. Dostupné z:
< https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/motory/linear/Rotační_a_lineární_krokové_motory.doc >
- [18] FAULHABER, *Motion Controller Technical Manual* [online]. [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: < http://www.faulhaber.com/manuals/pdf/geraetehandbuch/mc3x300x_v2-5/EN_7000_05038.pdf >
- [19] FRADEN, J.: *Handbook of Modern Sensors*, 2004, Springer-Verlag, ISBN 0-378-00750-4.
- [20] FAULHABER *Linear Servomotors Instruction Manual* [online]. [cit. 2014-05-30]. Dostupné z:
< http://www.faulhaber.com/manuals/pdf/geraetehandbuch/lm/EN_7000_05042.pdf >
- [21] SCHNEIDER ELECTRIC *Fieldbus manual SD328A CANopen DSP402* [online]. [cit. 2014-05-30]. Dostupné z:< [http://www.global-download.schneider-electric.com/mainRepository/EDMS_CORP5.nsf/69f5d72c7a0cf811c12573d800389503/05bc2020cf667c34852578a4005e3d41/\\$FILE/SD328A_CANopenDS402_manual_V201_EN.pdf](http://www.global-download.schneider-electric.com/mainRepository/EDMS_CORP5.nsf/69f5d72c7a0cf811c12573d800389503/05bc2020cf667c34852578a4005e3d41/$FILE/SD328A_CANopenDS402_manual_V201_EN.pdf) >
- [22] CIA., *CAN protocol description* [online]. [cit. 2014-05-30]. Dostupné z:
< <http://www.can-cia.org/index.php?id=device-design-can-protocol> >
- [23] ROMÁNEK, David. *Co je CANopen a jak na něj. Co je CANopen a jak na něj* [online]. 2006 [cit. 2014-05-30]. Dostupné z: <<http://www.hw.cz/produkty/co-je-canopen-a-jak-na-něj.html>>
- [24] FAULHABER, *Communication/function manual* [online]. [cit. 2014-05-30]. Dostupné z:
< http://www.faulhaber.com/manuals/pdf/schnittstelle/canopen_cia_b1_dc/EN_7000_05037.pdf>